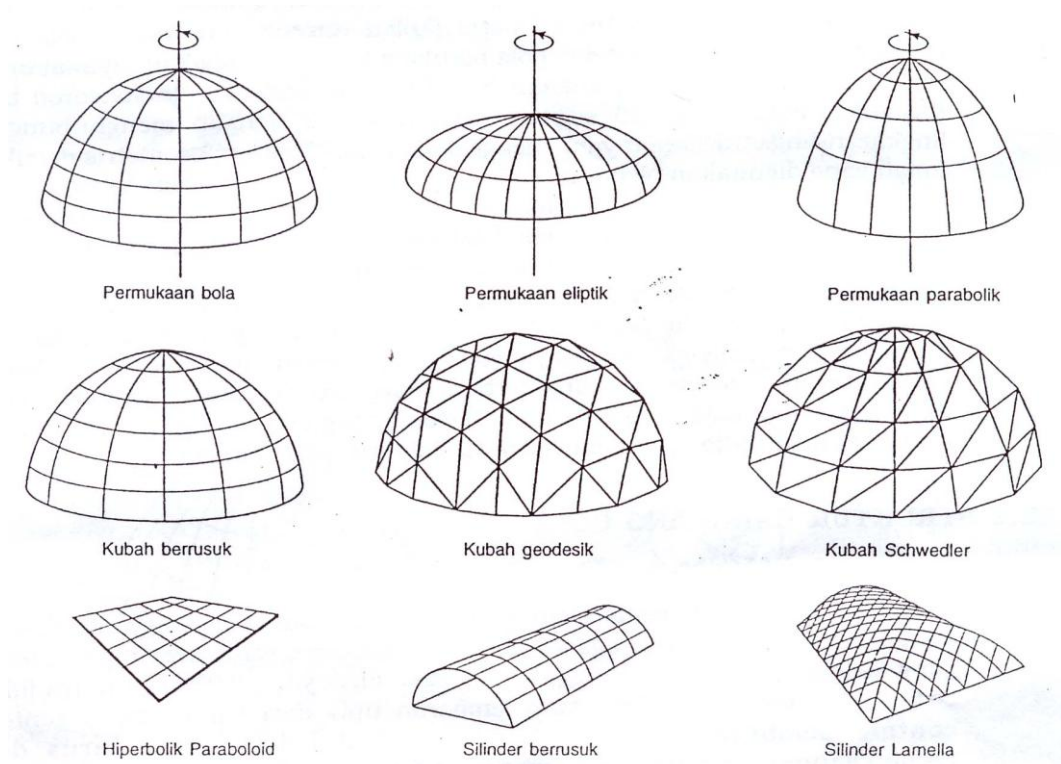


# STRUKTUR CANGKANG

## I. PENDAHULUAN

Cangkang adalah bentuk struktural berdimensi tiga yang kaku dan tipis serta yang mempunyai permukaan lengkung. Permukaan cangkang dapat mempunyai bentuk sembarang. Bentuk yang umum adalah permukaan yang berasal dari kurva yang diputar terhadap satu sumbu, permukaan translasional yang dibentuk dengan menggeserkan kurva bidang di atas kurva bidang lainnya (misalnya, permukaan parabola eliptik dan silindris), permukaan yang dibentuk dengan menggeserkan dua ujung segmen garis pada dua kurva bidang (permukaan hiperbolik paraboloid dan kinoid), dan berbagai bentuk yang merupakan kombinasi dari yang telah disebutkan diatas.

Bentuk cangkang tidak harus selalu memenuhi persamaan matematis sederhana. Segala bentuk cangkang mungkin saja digunakan untuk suatu struktur. Beban-bekan yang bekerja pada permukaan cangkang diteruskan ke tanah dengan menimbulkan tegangan geser, tarik, dan tekan pada arah dalam bidang permukaan tersebut. Struktur cangkang tipis khususnya cocok digunakan untuk memikul beban terbagi merata pada atap gedung. Struktur ini tidak cocok untuk memikul beban terpusat.



## **II. STRUKTUR CANGKANG BOLA**

### **A. Aksi Membran**

Cara yang baik untuk mempelajari perilaku permukaan cangkang yang dibebani adalah memandangnya sebagai analogi dari membran, yaitu elemen permukaan yang sedemikian tipisnya hingga hanya gaya tarik yang timbul padanya. Gelembung sabun atau lembaran tipis dari karet adalah contoh-contoh membran. Membran yang memikul beban tegak lurus dari permukaannya akan berdeformasi secara tiga dimensional disertai terjadinya gaya tarik pada permukaan membran. Aksi pikul bebannya serupa dengan yang ada pada sistem kabel menyilang.

Yang penting adalah adanya dua kumpulan gaya internal pada permukaan membran yang mempunyai arah saling tegak lurus. Hal yang juga penting adalah adanya tegangan geser tangensial pada permukaan membran, yang juga berfungsi memikul beban.

### **B. Jenis-jenis Gaya pada Cangkang Bola**

Adanya dua kumpulan gaya pada arah yang saling tegak lurus di dalam permukaan cangkang menjadikan cangkang berperilaku seperti struktur plat dua arah. Gaya geser yang bekerja di antara jalur-jalur plat planar mempunyai kontribusi dalam memberikan kapasitas pikul beban plat. Hal yang sama terjadi juga pada struktur cangkang.

Adanya dua karakteristik inilah, yaitu adanya gaya geser dan dua kumpulan gaya aksial, yang membedakan perilaku struktur cangkang dan perilaku struktur yang dibentuk dari pelengkung yang dirotasikan terhadap satu titik hingga didapat bentuk seperti cangkang.

Variasi pola beban yang ada, bagaimanapun, harus merupakan transisi perlahan agar momen lentur tidak timbul. Diskontinuitas tajam pada pola beban (misalnya beban terpusat) dapat menyebabkan timbulnya momen lentur. Pada pelengkung beban seperti ini dapat menimbulkan tegangan lentur yang sangat besar, sedangkan pada cangkang, lentur dengan cepat akan dihilangkan dengan adanya aksi melingkar. Jadi, beban yang sembarang pada pelengkung, misalnya gangguan tepi yang diasosiasikan dengan tumpuan-tumpuannya, dapat menyebabkan timbulnya momen lentur di seluruh bagian pelengkung. Pada cangkang, hal ini dapat dilokalisasi.

Cangkang adalah struktur yang unik. Cangkang dapat disebut bekeja secara funicular untuk banyak jenis beban yang berbeda meskipun bentuknya tidak benar-benar funicular. Cangkang berbentuk segmen bola dapat juga memikul beban hanya dengan gaya-gaya dalam bidang. Dalam hal ini gaya melingkar akan terjadi, meskipun bebannya penuh, karena beban strukturnya tidak benar-benar funicular. Gaya meridional pada cangkang yang mengalami beban vertikal penuh adalah selalu gaya tekan. Sedangkan gaya melingkar dapat berupa titik atau tekan, bergantung pada lokasi cangkang yang ditinjau. Pada cangkang setengah lingkaran, atau cangkang tinggi, ada kecenderungan pada jalur meridional bawah untuk berdeformasi ke arah luar. Jadi, jelas gaya-gaya melingkar yang terjadi adalah tarik. Di dekat puncak cangkang tersebut, jalur meridional cenderung berdeformasi ke dalam, yang berarti gaya melingkarnya adalah tekan.

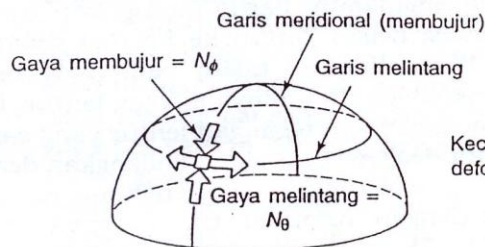
Tegangan yang diasosiasikan dengan gaya melingkar dan meridional umumnya kecil untuk kondisi beban terbagi merata. Beban terpusat pada umumnya

menyebabkan terjadinya tegangan yang sangat besar, karena itu sebaiknya dihindari pada permukaan cangkang.

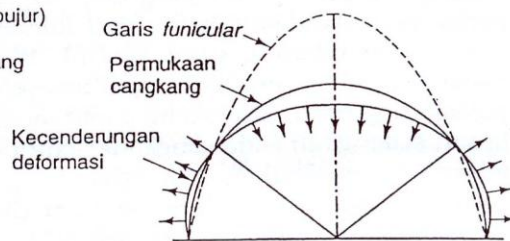
Lubang pada permukaan cangkang seperti yang disebutkan diatas mungkin saja ada, tetapi sebaiknya dihindari karena hal ini mengganggu kontinuitas dan juga mengurangi efisiensi permukaan cangkang. Apabila memang harus ada lubang, cangkang harus secara khusus diperkuat di tepi lubang tersebut.

### C. Gaya Meridional pada Cangkang Bola

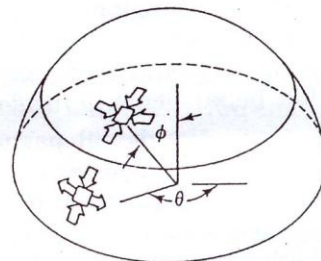
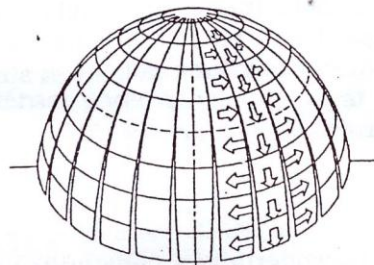
Tegangan dan gaya internal pada cangkang aksisimetris yang dibebani terbagi rata dapat diperoleh secara mudah dengan menggunakan persamaan keseimbangan dasar. Sebagai contoh, kita akan menganalisis kubah secara rinci.



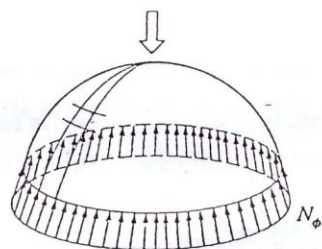
Gaya-gaya yang timbul pada cangkang bola.



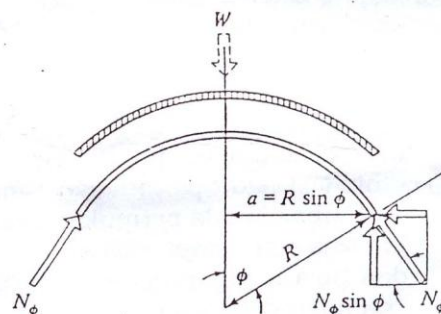
Hubungan antara garis-garis permukaan segmen cangkang bola, kecenderungan deformasi permukaan akibat beban terbagi rata, dan garis funicular untuk beban yang sama.



Gaya melingkar adalah tekan di daerah atas segmen bola dan tarik di daerah bawah. Gaya meridional selalu tekan.



Gaya meridional yang bekerja pada bidang cangkang.



Jumlah komponen vertikal dari gaya meridional dalam bidang yang timbul secara internal di dalam cangkang sama dengan beban mati dan beban hidup vertikal.

Perhatikan segmen kubah seperti terlihat pada gambar. Anggap bahwa struktur ini menerima beban mati yang berasal dari berat sendiri cangkang dan lapisan penutupnya. Apabila beban mati total tersebut kita sebut  $W$  dan gaya internal dalam bidang per-satuan panjang yang ada pada permukaan cangkang adalah  $N_\phi$ , maka tinjauan keseimbangan akan menghasilkan ekspresi sebagai berikut :

$$\Sigma F_Y = 0 :$$

$$W = (N_\phi \sin \phi) (2\pi\alpha)$$

Dengan  $\phi$  adalah sudut yang mendefinisikan potongan cangkang dan  $\alpha$  adalah jari-jari kelengkungan sesaat di titik tersebut. Gaya  $N_\phi$  pada cangkang adalah gaya tekan dalam bidang yang terjadi pada potongan horizontal yang didefinisikan dengan  $\phi$ . Komponen vertikal dari gaya ini (dianggap merata pada keliling cangkang) adalah  $N_\phi \sin \phi$ . Karena gaya  $N_\phi$  dinyatakan sebagai gaya per-satuan panjang (misal lb/ft atau kN/m) di sepanjang potongan. Maka gaya total yang diasosiasikan dengan  $N_\phi$  adalah keliling potongan (diberikan oleh  $2\pi\alpha$ ) dikalikan dengan  $N_\phi \sin \phi$  ( atau, dengan kata lain, panjang total dikalikan dengan panjang gaya per satuan panjang menghasilkan gaya total). Gaya ke atas ini harus sama besar dengan gaya ke bawah yang ada, jadi  $W = N_\phi \sin \phi (2\pi\alpha)$ . Ekspresi ini dapat pula dinyatakan dengan jari-jari aktual bola dengan menggunakan hubungan  $\alpha = R \sin \phi$ .  $W = N_\phi \sin \phi (2\pi R \sin \phi)$ . Dengan demikian, kita peroleh :

$$N_\phi = \frac{W}{2\pi R \sin^2 \phi}$$

Apabila beban total yang bekerja ke bawah ( $W$ ) ditentukan, maka gaya internal pada cangkang dapat diperoleh secara langsung. Karena gaya-gaya internal ini dinyatakan dalam gaya per satuan panjang, maka tegangan internal yang dinyatakan dalam gaya per satuan luas (misal lb/in<sup>2</sup> atau kN/mm<sup>2</sup>) dapat diperoleh dengan membaginya dengan tebal cangkang. Jadi,  $f_\phi = N_\phi / tL$  dengan  $L$  mempunyai satuan panjang dan  $N_\phi$  mempunyai satuan gaya per satuan panjang.

Apabila beban per satuan luas yang bekerja ke bawah pada cangkang disebut  $\omega$ , maka keseimbangan dalam arah vertikal akan menghasilkan :

$$\Sigma F_Y = 0 :$$

$$- \int_{\phi_1}^{\phi_2} \omega(2\pi R \sin \phi)R d\phi + N_\phi \sin \phi (2\pi R \sin \phi) = 0$$

dengan  $\phi_1$  dan  $\phi_2$  mendefinisikan segmen cangkang yang ditinjau. Suku sebelah kiri adalah  $W$ . Untuk  $\phi_1 = 0$ , maka :

$$N_\phi = \frac{R\omega}{1 + \cos \phi}$$

Ekspresi ini pada kenyataannya identik dengan  $N_\phi = W/2\pi R \sin^2 \phi$ . Kedua ekspresi tersebut menunjukkan gaya meridional yang ada pada potongan horizontal.

#### D. Gaya-gaya Melingkar pada Cangkang Bola

Gaya-gaya melingkar (hoop forces), yang biasa disebut  $N_\phi$  dan dinyatakan sebagai gaya per satuan panjang dapat diperoleh dengan meninjau keseimbangan dalam arah transversal. Karena beban yang kita tinjau ini berarah ke bawah, bukan radial ke luar, maka ekspresi gaya eksternal perlu disesuaikan. Komponen radial dari beban ke bawah dapat ditulis  $p_r = \omega \cos \phi$ . Jadi ekspresi yang menghubungkan gaya melingkar dan meridional adalah :

$$\omega \cos \phi = \frac{N_\phi}{r_1} + \frac{N_\theta}{r_2}$$

atau

$$N_\theta = r_2 (\omega \cos \phi) - \left( \frac{r_2}{r_1} \right) N_\phi$$

Untuk bola,  $r_1 = r_2 = R$ , dan mensubstitusikan ekspresi  $N_\theta$ , maka kita peroleh:

$$N_\theta = R\omega \left( -\frac{1}{1 + \cos \phi} + \cos \phi \right)$$

Ini adalah ekspresi sederhana untuk gaya melingkar yang dinyatakan dalam jari-jari bola ( $R$ ) dan beban ke bawah ( $\omega$ ).

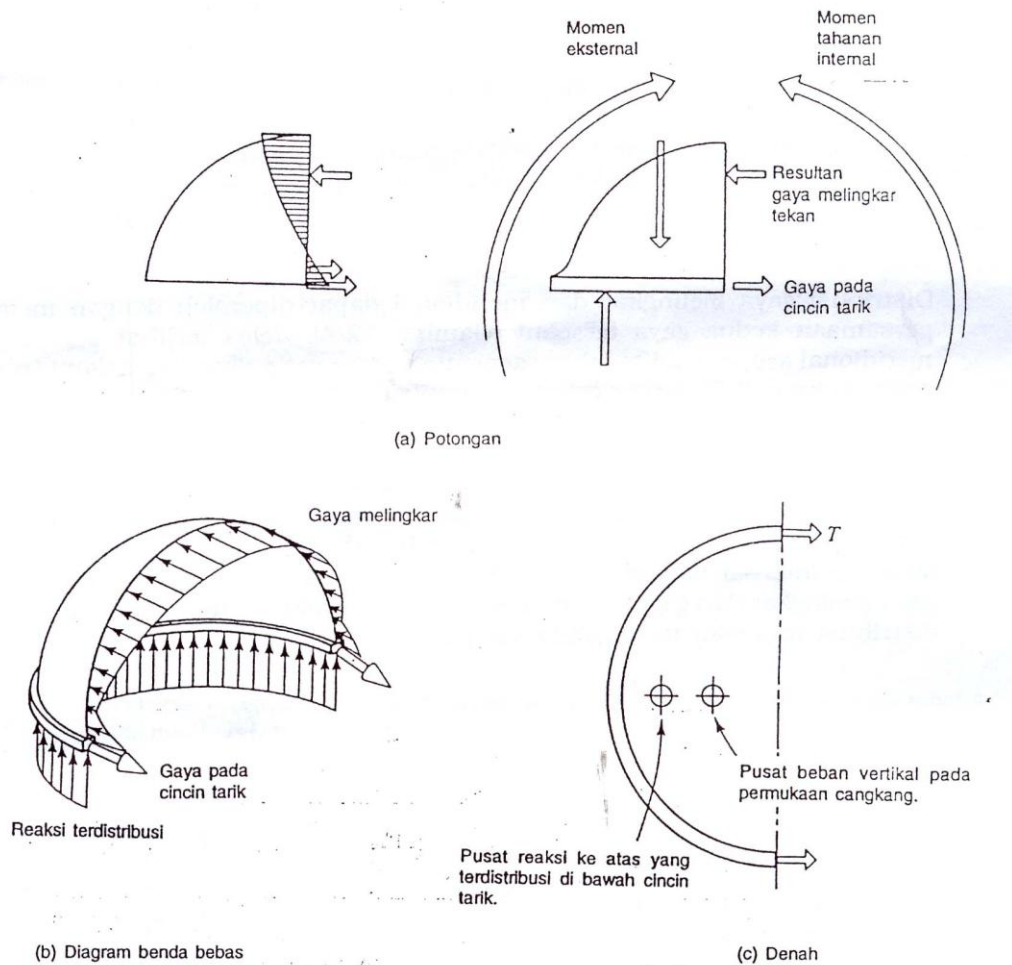
#### E. Distribusi Gaya

Distribusi gaya melingkar dan meridional dapat diperoleh dengan memplot persamaan kedua gaya tersebut. Jelas terlihat bahwa gaya meridional selalu bersifat tekan, sementara gaya melingkar mengalami transisi pada sudut  $51^\circ 49'$  diukur dari garis vertikal. Potongan cangkang di atas batas ini selalu mengalami tekan, sedangkan di bawahnya dapat timbul tarik dalam arah melingkar. Tegangan-tegangan tersebut selalu relatif kecil.

Sebagaimana yang terjadi pada struktur lain, momen eksternal pada setiap potongan harus dapat diimbangi oleh momen tahanan internal (dalam hal ini diberikan oleh kopel yang dibentuk antara gaya melingkar dan gaya cincin). Dengan cara demikian, kita dapat mempelajari distribusi tegangan melingkar tarik pada kubah.

#### F. Gaya Terpusat

Alasan mengapa beban tersebut harus dihindari pada struktur cangkang dapat terlihat jelas dengan menganalisis gaya-gaya meridional yang ditimbulkan oleh beban terpusat. Ekspresi umum yang telah kita peroleh sebelum ini adalah  $N_\phi = W/2\pi R \sin^2 \phi$  dimana  $W$  adalah beban total berarah ke bawah. Untuk cangkang yang memikul beban terpusat  $P$ , ekspresi ini menjadi  $N_\phi = P/2\pi R \sin^2 \phi$ . Apabila beban terpusat tersebut bekerja pada  $\phi = 0$  (puncak cangkang), maka tegangan tepat dibawah beban tersebut menjadi tak hingga. Jelas hal ini dapat menyebabkan keruntuhan apabila permukaan cangkang tidak dapat memberikan tahanan momen dan beban tersebut memang benar-benar tidak dapat memberikan tahanan momen dan beban tersebut memang benar-benar terpusat. Dalam hal ini, sebaiknya beban terpusat dihindari pada struktur cangkang.

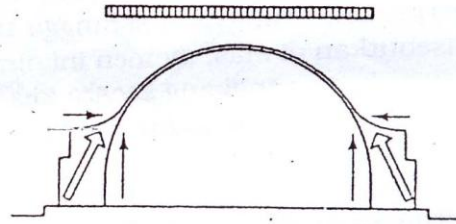


### G. Kondisi Tumpuan: Cincin Tarik dan Tekan

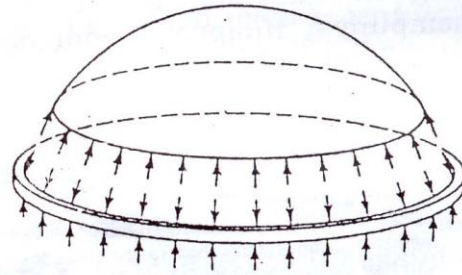
Tinjauan desain yang utama pada cangkang putar adalah masalah di tumpuannya atau tepi-tepinya. Sama halnya dengan penggunaan batang pengikat pada pelengkung (untuk menahan gaya horizontal), kita juga harus melakukan cara-cara khusus untuk mengatasi gaya tendangan horizontal yang diasosiasikan dengan gaya dalam bidang di tepi bawah cangkang. Pada kubah, misalnya, sistem penyokong melingkar perlu dilakukan. Alternatif lain adalah menggunakan cincin lingkaran, yang disebut cincin tarik, di dasar kubah sehingga dapat menahan komponen keluar dari gaya meridional. Karena gaya yang disebut terakhir ini selalu tekan, maka komponen horizontal selalu bearah ke luar. Carena itulah cincin containment selalu mengalami gaya tarik. Seandainya pada puncak cangkang terdapat lubang, maka komponen gaya meridional di dasar cangkang akan berarah ke dalam sehingga gaya pada cincin adalah gaya tekan.



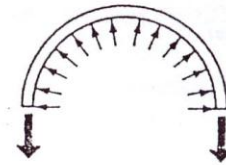
- (a) Penyokong (*buttresses*). Komponen vertikal dan horizontal dari gaya meridional dapat dipikul oleh penyokong. Penyokong ini harus dapat menahan gaya dorong ke luar yang terjadi.



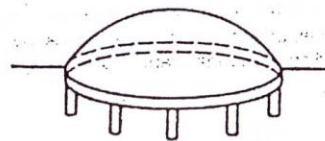
- (b) Cincin tarik. Cincin tarik menerus dapat digunakan untuk menahan dorongan horizontal. Hanya gaya ke bawah yang disalurkan ke tanah.



- (c) Apabila cincin tarik digunakan, cincin itu harus menerus di sekeliling cangkang. Apabila tidak demikian, maka cincin tersebut tidak bermanfaat dan akan ada tegangan berlebihan pada cangkang.



- (d) Cangkang yang menggunakan cincin tarik dapat ditumpu oleh kolom-kolom karena di bawah cincin hanya ada gaya vertikal yang harus disalurkan ke tanah. Cangkang tanpa cincin tarik memerlukan sistem penyokong.



Cincin tarik berupa cincin planar yang menahan dorongan ke luar dari cangkang, jadi cincin ini mengalami tarik. Besar dorongan (tendangan) ke luar ini (per satuan panjang) adalah  $N_{\phi} \cos \phi$ . Gaya ini menyebabkan timbulnya gaya tarik pada cincin sebesar  $T = (N_{\phi} \cos \phi) \alpha$  dengan  $\alpha$  adalah jari-jari cincin planar.

Cincin tarik harus dapat menyerap semua dorongan horizontal yang ada. Apabila terletak di atas tanah, harus ada fondasi menerus untuk meneruskan komponen gaya vertikal ke tanah. Alternatif lain, cincin dapat ditumpu pada elemen-elemen lain (misalnya kolom) yang hanya memukul berat vertikal.

Namun penggunaan cincin tarik, akan menimbulkan juga momen lentur pada permukaan cangkang dimana terdapat pertemuan antara cangkang dan cincin. Momen lentur ini selalu diakibatkan oleh ketidakserasian deformasi yang terjadi diantara cincin dan cangkang. Deformasi melingkar pada cangkang dapat bersifat

tekan. Sementara itu, deformasi balok cincin cenderung tidak sama dengan deformasi cangkang. Karena elemen-elemen tersebut harus digabungkan, maka cincin tepi membatasi gerakan bebas permukaan cangkang sehingga timbul momen di tepi cangkang. Seperti telah disebutkan di atas, momen ini dimatikan dengan cepat pada cangkang sehingga permukaan cangkang secara keseluruhan tidak terpengaruh.

Secara ideal, tumpuannya tidak boleh menimbulkan momen lentur pada permukaan cangkang. Jadi, kondisi jepit harus dihindari. Tidak seperti pada pelengkung, adanya gaya melingkar pada cangkang menyebabkan cangkang itu mengalami deformasi yang berarah ke luar bidang. Menahan deformasi ini dengan menggunakan hubungan sendi sama saja dengan memberikan gaya pada tepi cangkang, yang berarti juga menimbulkan momen lentur. Karena itulah tumpuan rol lebih disukai. Sayangnya, tumpuan demikian sulit dibuat pada struktur cangkang. Selain itu, perubahan sudut sedikit saja pada tumpuan itu dapat menimbulkan momen lentur meskipun masih lebih kecil daripada momen yang ditimbulkan dari penggunaan tumpuan sendi atau tumpuan jepit.

Berdasarkan tinjauan kemudahan konstruksi, momen lentur (yang tidak besar) biasanya boleh saja terjadi di tepi cangkang dengan maksud supaya kondisi fondasi dan tepi cangkang mudah dilaksanakan. Cangkang diperkaku secara lokal (biasanya dengan cara menambah ketebalan) di sekitar tepi, khususnya diperkuat terhadap lentur.

Adanya masalah ketidakserasian deformasi mengharuskan kita mendesain dengan tujuan meminimumkan kondisi yang tidak diinginkan. Salah satu metode yang efektif adalah dengan cara pascatarik dalam mengontrol deformasi. Balok cincin yang biasanya mengalami tarik, misalnya, dapat diberi gaya pascatarik sedemikian rupa sehingga gaya tekan dapat timbul terlebih dahulu pada cincin. Gaya dorong ke luar dari cangkang kubah akan mengurangi gaya tekan. Apabila gaya pascatarik awal dikontrol dengan baik, maka deformasi cincin juga bisa dikontrol sehingga ketidakserasian dengan cangkang dapat diperkecil. Permukaan cangkang itu sendiri juga dapat diberi gaya pascatarik dalam arah melingkar untuk mengontrol deformasi dan gaya pada cangkang.

## **H. Tinjauan-tinjauan Lain**

Banyak faktor yang harus ditinjau dalam mendesain cangkang selain yang telah dibahas di atas. Salah satu faktor kritis itu adalah keharusan menjamin bahwa cangkang tidak akan mengalami tekuk. Seperti telah disebutkan, masalah ini adalah masalah kestabilan. Apabila kelengkungan permukaan cangkang relatif datar, maka dapat terjadi tekuk snap-through atau tekuk lokal. Sebagaimana yang terjadi pada kolom panjang, ketidakstabilan dapat terjadi pada taraf tegangan rendah. Hal ini dapat dicegah dengan menggunakan permukaan yang berkelengkungan tajam. Keharusan menggunakan berkelengkungan tajam ini tentu saja menyebabkan kita tidak dapat menggunakan cangkang berprofil rendah dan berbentang besar. Masalah ini juga terjadi pada cangkang yang terbuat dari elemen-elemen linear kaku.

Masalah yang juga penting diperhatikan adalah cangkang harus mampu juga menahan beban-beban yang berarah tidak vertikal. Biasanya beban angin bukan merupakan masalah kritis dalam desain. Apabila ada beban tersebut, kita harus berhati-hati dalam mendesain kondisi tumpuan cangkang.



### **III. CANGKANG SILINDRIS**

Perilaku bentuk-bentuk struktural yang didefinisikan oleh permukaan-permukaan translasional sangat dipengaruhi oleh proporsi relatif cangkang dan kondisi tumpuan.

Perhatikan permukaan silindris yang terletak diatas dinding yang umumnya disebut terowongan, dapat dipandang sebagai permukaan yang terdiri atas sederetan pelengkung sejajar asalkan dinding penumpu tersebut dapat memberikan reaksi yang diperlukan. Apabila permukaan itu kaku, maka permukaan tersebut juga dapat menunjukkan aksi plat yang dibutuhkan dalam memikul beban tidak merata. Jenis yang sama juga akan terjadi apabila permukaan dipikul oleh balok yang sangat kaku. Balok ini pada gilirannya akan meneruskan beban ke tumpuannya secara melentur.

Perilaku cangkang yang sangat pendek, sangat berbeda dengan perilaku cangkang yang tekan disebutkan di atas apabila pengaku ujung transversal digunakan. Beban permukaan dapat diteruskan secara langsung ke pengaku-pengaku ujung secara aksi plat longitudinal.

Pada cangkang yang panjang dibandingkan dengan bentang trnsversalnya ada aksi yang sangat berbeda dengan cangkang pendek, khususnya apabila balok tepi tidak digunakan, atau apabila digunakan, balok tersebut sangat fleksibel. Perlu diingat bahwa setiap balok tepi akan menjadi fleksibel apabila panjangnya bertambah. Dengan demikian, cangkang silindris akan mulai cenderung berperilaku seperti pelengkung dalam arah transversal. Balok tepi fleksibel tidak dapat memberikan tahanan terhadap gaya tendangan. Sebagai akibatnya, tidak ada aksi seperti pelengkung pada arah ini. Hal ini apabila tidak ada balok tepi, tepi bebas longitudinal akan berdefleksi ke arah dalam, bukan ke luar, pada kondisi beban penuh. Oleh karena itu, harus ada jenis lain dari mekanisme pikul beban. Struktur seperti ini disebut cangkang barrel. Aksi utama pada cangkang demikian adalah dalam arah longitudinal, bukan transversal. Lentur longitudinal terjadi dan analog dengan yang terjadi pada balok sederhana atau plat lipat. Tegangan tekan pada arah longitudinal dapat terjadi di dekat pucak dari permukaan lengkung, dan tegangan tarik di bagian bawah.

Analogi dengan struktur plat lipat akan sangat berguna karena banyak prinsip desain yang sama. Pengaku transversal, misalnya, sangat berguna dalam meningkatkan kapasitas pikul beban cangkang barrel. Jika semakin banyak pengaku digunakan, atau apabila cangkang barrel yang ditinjau merupakan satu diantara deretan cangkang yang bersebelahan, maka perilaku seperti balok akan semakin nyata sehingga cara-cara analisis yang biasa dipakai pada balok dapat digunakan. Cangkang barrel yang panjangnya sekitar tiga kali atau lebih dari bentang transversalnya dapat menunjukkan perilaku longitudinal dengan jelas.

### **IV. CANGKANG HIPERBOLIK PARABOLOID**

Permukaan ruled biasanya membutuhkan analisis yang sangat rumit. Pada umumnya, perilaku cangkang demikian dapat dipelajari dengan memandangnya sebagai kelengkungan yang dibentuk dari garis-garis lurus. Apabila kondisi tepi dapat memberikan tahanan, akan ada reaksi seperti pelengkung di daerah yang cembung, dan aksi seperti kabel di daerah yang cekung. Adanya gaya tekan atau tarik pada permukaan tersebut akan bergantung pada aksi yang ada. Apabila permukaan mempunyai kelengkungan kecil, maka aksi plat akan ada, yang berarti membutuhkan

penampang yang lebih tebal. Apabila tepi cangkang tidak ditumpu, maka perilaku balok dapat terjadi.

Permukaan ruled dapat saja dibuat dengan menggerakkan dua ujung dari suatu garis lurus pada dua garis lurus sejajar, tetapi terpuntir. Bentuk ini dapat pula dipandang sebagai permukaan translasional yang dibentuk dengan cara menggerakkan parabola cekung pada parabola cembung. Struktur seperti ini menunjukkan aksi seperti pelengkung pada arah kelengkungan cembung dan aksi seperti kabel pada arah cekung. Dengan demikian, medan tegangan pada plat adalah tarik pada satu arah dan tekan pada arah tegak lurusinya. Kedua arah ini membentuk sudut  $45^{\circ}$  dengan garis lurus pembentuk cangkang tersebut.

