

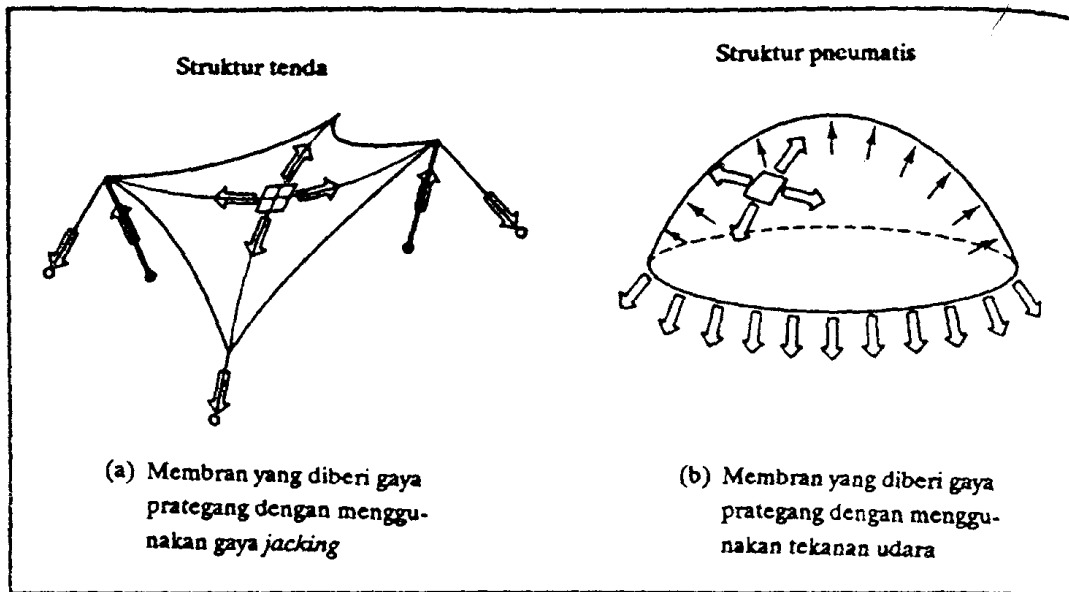
Bab 11
STRUKTUR MEMBRAN

11.1 PENDAHULUAN

Membran adalah struktur permukaan fleksibel tipis yang memikul beban dengan mengalami terutama tegangan tarik. Gelembung sabun adalah contoh klasik yang dapat dipakai untuk mengilustrasikan apakah struktur membran itu dan bagaimanakah perilakunya. Struktur membran cenderung dapat menyesuaikan diri dengan cara struktur tersebut dibebani. Selain itu, struktur ini sangat peka terhadap efek aero dinamika dari angin, efek ini dapat menyebabkan terjadinya fluttering (getaran). Dengan demikian, membran yang digunakan pada gedung karus di stabilkan dengan cara tertentu hingga bentuknya dapat tetap dipertahankan pada saat memikul berbagai kondisi pembebanan.

Kita akan membahas secara khusus penstabilan dengan menggunakan prategang pada permukaan membran. Hal ini dapat dilakukan baik dengan memberikan gaya eksternal yang menarik membran maupun dengan menggunakan tekanan internal apabila membrannya berbentuk volume tertutup.

Contoh pemberian prategang yang menggunakan gaya eksternal adalah struktur tenda. Akan tetapi adapula tenda yang tidak mempunyai permukaan yang benar-benar ditarik oleh kabel sehingga dapat bergerak apabila dibebani. Biasanya membran itu diberi tegangan dalam arah tegak lurus di seluruh permukaannya.



Gambar 11-1 Struktur membran

Menstabilkan membran dengan menggunakan tekanan intrnal dapat di lakukan apabila membran mempunyai volume tertutup. Kelompok membran demikian biasa disebut struktur pneumatic, sebutan yang sesuai dengan cara struktur itu mendapat kestabilan.

11.2 PRINSIP-PRINSIP UMUM

11.2.1 Aksi Dasar

Dasar mekanisme pikul beban pada struktur membran adalah tarik. Membran yang memikul beban tegak lurus terhadap permukaannya dapat mengalami deformasi secara tiga dimensi (bergantung pada kondisi tumpuan dan pembebanannya) dan memikul beban secara tarik. Aksi pikul beban ini serua dengan yang terjadi pada sistem kabel menyilang, selain tegangan tarik, terjadi juga tegangan geser tangensial pada permukaan lengkung. Kedua jenis tegangan ini bekerja sama dalam memikul beban. Jadi, pada membran terjadi aksi tarik dua arah dan aksi geser tangensial apabila membran distabilkan dan dibebani secara funicular serta beban itu tidak menyebabkan terjadinya tegangan tekan.

11.2.2 Struktur Pneumatic

Struktur pneumatic biasanya digunakan untuk konstruksi pneumatic khusus yang digunakan pada gedung. Ada dua kelompok utama pada struktur pneumatic: struktur yang ditumpu udara (air-supported structure) dan struktur yang digelembungkan udara (air-inflated structure). Struktur yang ditumpu udara terdiri atas satu membran (menutup ruang yang berguna secara fungsional) yang ditumpu oleh perbedaan tekanan internal kecil. Struktur yang digelembungkan udara ditumpu oleh kandungan udara bertekanan yang menggelembungkan elemen-elemen gedung. Volume internal udara gedung tetap sebesar tekanan udara

Struktur yang digelembungkan udara mempunyai mekanisme pikul beban yang lain. Udara yang ditekan digunakan untuk menggelembungkan bentuk-bentuk (misalnya pelengkung, dinding, atau lolom) yang digunakan untuk penutup gedung. Ada dua jenis utama dari struktur yang digelembungkan udara yang banyak digunakan, yaitu struktur rib tergelembung dan struktur dinding rangkap. Untuk mendapat kestabilan, struktur yang digelembungkan udara biasanya memerlukan tekanan internal yang lebih besar dari pada yang dibutuhkan oleh struktur yang ditumpu udara. Hal ini karena karena tekanan internal tidak dapat langsung digunakan untuk mengimbangi beban eksternal, tetapi harus digunakan untuk memberi bentuk pada struktur. Pada umumnya, sistem struktur yang ditumpu udara dapat mempunyai bentang lebih besar daripada struktur yang digelembungkan.

11.2.3 Struktur Jaringan dan Tenda

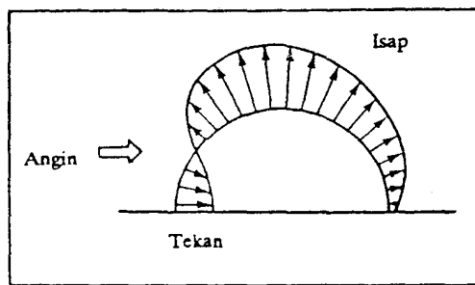
Untuk struktur-struktur yang mendapat kestabilannya dari gaya-gaya prategang eksternal, penerapan prinsip desain yang mengharuskan tarik permukaan harus dipertahankan luas terdapat apabila beban normal bekerja padanya. Besar gaya prategang yang diberikan untuk menstabilkan tidak boleh menyebabkan tegangan membran melebihi kapasitas material yang digunakan. Untuk struktur berbentang besar, biasanya membran terdiri atas jaring kabel baja berjarak dekat yang mampu memikul gaya prategang relatif besar.

11.3 ANALISIS DAN DESAIN STRUKTUR PNEUMATIS

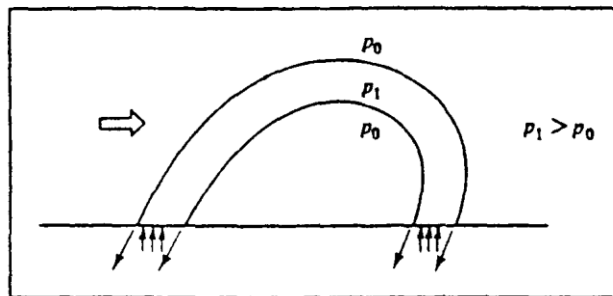
11.3.1 Struktur yang Ditumpu Udara

Beberapa jenis beban dapat bekerja pada struktur yang ditumpu udara. Salju adalah salah satu beban yang berarah ke bawah pada segmen-segmen bola yang berprofil relatif rendah, salju dapat menutupi seluruh atap. beban angin adalah masalah utama. Beban beban yang ditimbulkan oleh angin biasanya kompleks dan terdiri atas tekanan dan isapan.

Tegangan membran akibat Tegangan Internal. Gaya-gaya dalam bidang-bidang (In plane) pada suatu membran yang ditimbulkan oleh tekanan internal bergantung pada dimensi dan bentuk geometris membran selain juga pada besar tekanan internal yang ada.



Gambar 11-5 Beban angin pada struktur pneumatis bola



Gambar 11-6 Efek angin pada struktur pneumatis berdinding rangkap

Gaya – gaya pada bentuk membran sederhana biasanya mudah ditentukan. Mula – mula tinjaulah cincin planar yang mengalami tekanan internal persatuan luas p_r berarah radial keluar seperti terlihat pada gambar 11 – 7. gaya tarik yang timbul pada cincin itu dapat diperoleh dengan membuat potongan melalui garis tengah cincin dan meninjau keseimbangan translasinya. Efek translasional total dari tekanan p_r adalah jumlah dari komponen gaya yang bekerja dalam arah yang ditinjau. Efek normal ini sama dengan tekanan internal yang bekerja pada luas terproyeksi dari cincin. Gaya internal total dari tahanan adalah $2T$ dimana T adalah gaya yang terjadi pada ring. Dengan demikian, $2T = p_r (2R)$ atau $p_r = T/R$ atau $T = p_r R$. Apabila bentuk sebenarnya melengkung pada dua arah, maka ekspresi analog dapat ditulis,

yaitu $P_r = T_1/R_1 + T_2/R_2$, dimana R_1 dan R_2 adalah jari – jari kelengkungan serta T_1 dan T_2 adalah gaya – gaya dalam bidang yang saling tegak lurus.

Ekspresi umum berbentuk $P_r = T_1/R_1 + T_2/R_2$ sangat berguna dalam analisis membran. Untuk permukaan silindris, $R_1 = R$ dan $R_2 \rightarrow \infty$ sehingga $T = prR$. Untuk bola, $R_1 = R_2 = R$ sehingga $T = p_r R/2$. Ini adalah gaya internal yang dinyatakan dalam gaya per satuan panjang membran pada bentuk bola yang memikul tekanan internal p_r . Gaya – gaya membran internal dapat dikonversikan menjadi tegangan dengan memperhitungkan tebal membran (jadi, $f = T/tL$ di mana L adalah panjang satu satuan). Ekspresi ini juga akan digunakan dalam analisis secara rinci.

Tekanan Internal yang dibutuhkan. Ada tekanan internal yang dibutuhkan untuk mencegah membran dari terlipat untuk segala kondisi pembebanan yang mungkin terjadi padanya.

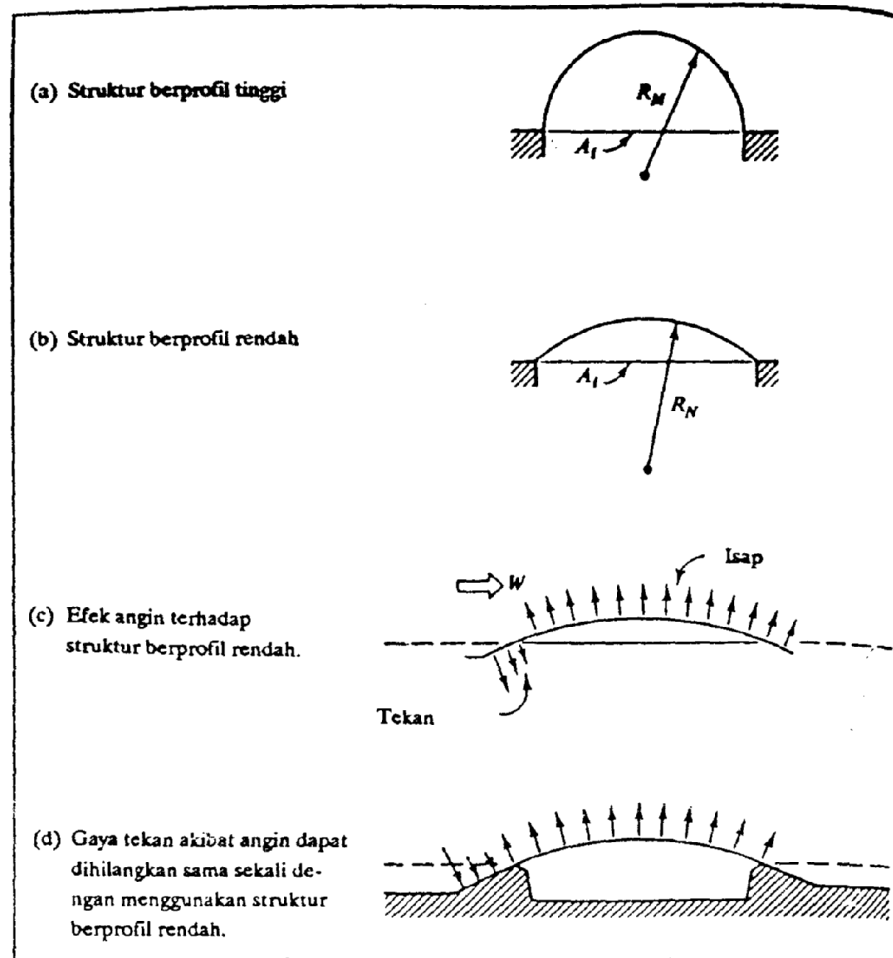
Pada umumnya, tekanan internal yang diperlukan itu kecil. Tekanan internal sekitar 100 mm (tekanan air) adalah tekanan yang umumnya terjadi. Kondisi tumpuan. Bagaimana struktur yang ditumpu udara bertemu dengan tanah merupakan masalah desain kritis. Gaya keatas (upfit) yang besar, bergantung pada bentuk struktur dan gaya horizontal pada tumpuannya.

Perhatikan struktur yang ditumpu udara pada gambar 11 – 8. struktur ini mengalami gaya ke atas $P_r A_i$ di mana A_i adalah luas proyeksi dari struktur (sama dengan bidang tanah yang tertutup). Jadi, gaya ke atas sebesar $T_v = P_r A_i / L$ (di mana L adalah keliling cincin di dasar dan T_v dinyatakan per satuan panjang tumpuan) akan timbul pada tumpuan. Perhatikan bahwa apabila membran itu adalah segmen bola, maka $T_v = P_r \pi (R \sin \phi)^2 / 2\pi R \sin \phi$ dan $T = T_v / \sin \phi$. Selain itu gaya horizontal sebesar $T_v / \tan \phi$ juga terjadi pada tumpuan.

Untuk struktur besar, cara yang sering di[akai untuk menahan gaya – gaya tersebut adalah menggunakan cincin *containment* di dasarnya. Pada struktur berprofil rendah, komponen horisontal reaksi membran mempunyai arah kedalam sehingga cincin containment akan mengalami tekanan. Cincin kontainment untuk struktur yang merupakan segmen bola adalah cincin lingkaran.

Propil salah satu masalah desain yang berkaitan dengan struktur yang di tumpu udara adalah menentukan profil struktur. Untuk p yang sama, membran bola berprofil rendah akan mengalami tegangan lebih besar daripada yang berprofil tinggi. Selain itu pada struktur berprofil rendah terjadi reaksi horizontal yang besar, jadi membutuhkan cincin tekan yang besar. Volume gedung hesar dan ditutupi oleh struktur berprofil tinggi tentu saja membutuhkan sisitem mekanis lebih banyak yang dibutuhkan untuk menjamin kondisi kondisi keamanan penggna gedung.

Gaya eksternal akibat efek angin dapat menjadikan struktur berprofil rendah menjadi menguntungkan. Dengan memotong segmen bola kita dapat memperoleh kondisi dimana efek angin hanya isapan.gaya angina isap mempinyai kecenderungan mengangkat atap, bukan menekan ke bawah. Dengan demikian, pemberian tekanan internal juga akan terpengaruh.



Gambar 11-9 Tinjauan profil

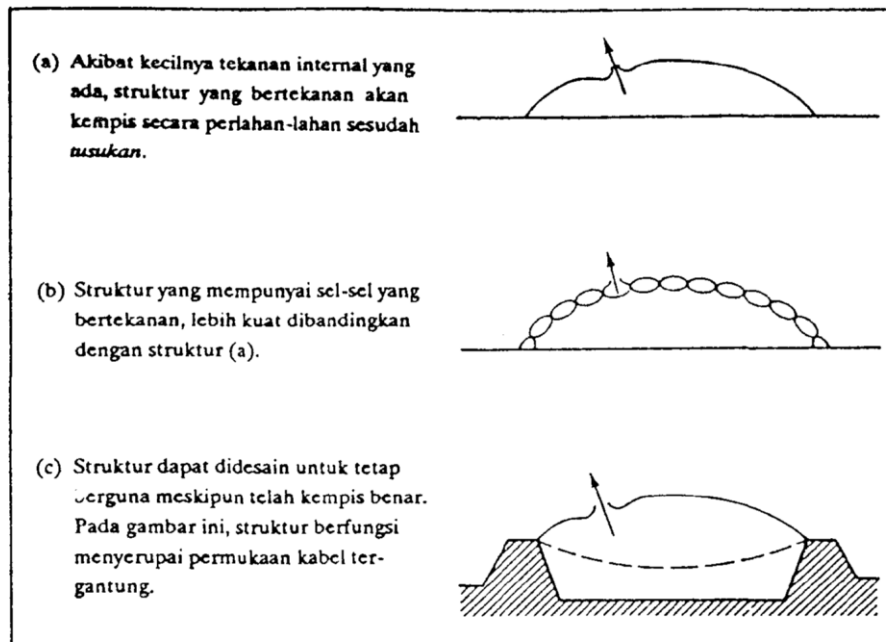
11.3.2 struktur yang digelembungkan oleh udara

perhatikan balok yang digelembungkan udara di mana tekanan pemgelembung adalah sebesar P_r . Tegangan tarik membran longitudinal merata akibat tekanan tersebut akan terjadi pada seluruh panjangnya apabila struktur tidak dibebani. Pemberian beban eksternal cenderung menyebabkan terjadinya tegangan disepanjang permukaan atas dan tegangan tarik disepanjang permukaan bawah seperti pada balok yang dibuat pada materiak kaku. Sebab akibatnya, tegangan tarik yang semula ada disepanjang permukaan atas akan berkurang dan dipermukaan bawah bertambah.

11.3.3 Tinjauan lainnya

Hal yang sering merupakan masalah pada penggunaan struktur pneumatis adalah apa yang akan terjadi apabila membran berkubang. Dalam hal ini ada gunanya apabila kita membandingkan dua pneumatik, yaitu balon dan struktur yang ditumpu udara.

Apabila balon ditusuk, jekas akan meledak. Pada kenyataannya, tusukan menyebabkan terjadinya retak yang akan menjalar secara cepat. Cepatnya penjalaran itu adalah karena sangat besarnya tekanan internal pada balon. Pada saat retak mulai terjadi, semua energi yang tersimpan mempercepat penjalaran retak. Pada struktur seperti ini, yang disebut sistem berenergi besar, retak menjalar dengan sangat cepat. Sebaliknya, gedung pneumatis yang ditumpu udara adalah sistem berenergi rendah, pemberian tekan internal relatif kecil. Masalah lain sehubungan dengan struktur pneumatis adalah pemilihan material membran karena banyak jenis material yang menurun mutunya dari waktu ke waktu sebagai akibat efek ultraviolet dari matahari. Masalah ini dapat diatasi dengan pemilihan material yang tepat.

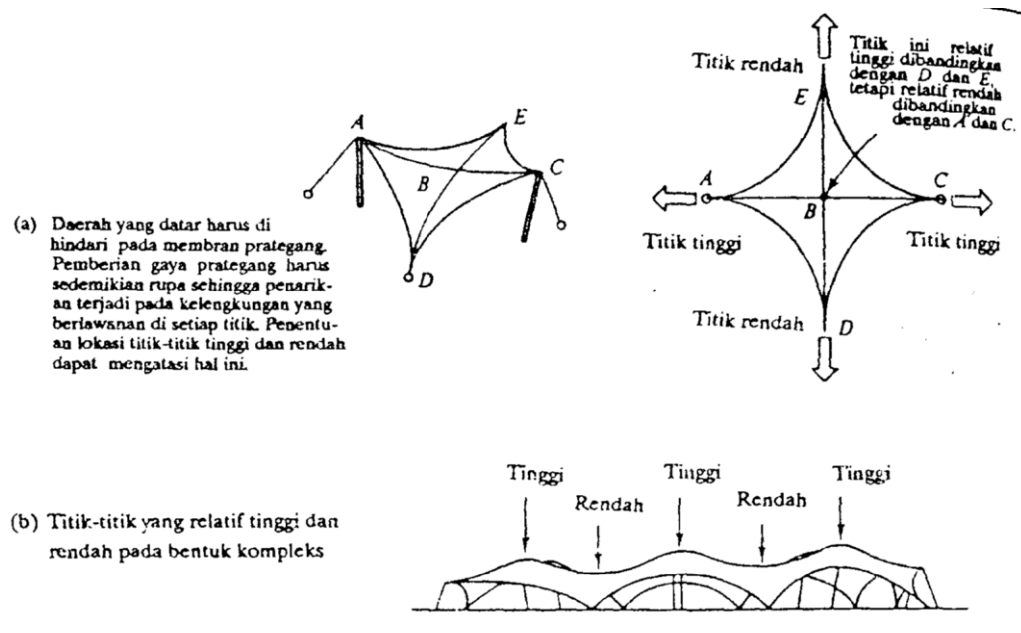


Gambar 11-11 Tusukan (lubang) pada struktur yang dikembangkan (digelebungkan) oleh udara (air-inflated structure)

11.4 ANALISIS DAN DESAIN STRUKTUR TENDA DAN JARING

11.4.1 Kelengkungan

Kita sebaiknya menghindari penggunaan luasan datar pada permukaan membran karena, apabila digunakan, akan membutuhkan gaya prategang besar untuk mempertahankan bentuknya pada saat dibebani. Jadi diperlukan struktur yang mempunyai kelengkungan besar. Kelengkungan harus dijamin besarnya dengan mengontrol titik-titik tinggi dan rendah. Dua titik tinggi harus dipisah oleh satu titik rendah, sebaliknya, dua titik tinggi (A dan C) dipisahkan oleh satu titik yang relatif rendah (B). sedangkan titik b ini relatif lebih tinggi daripada dua titik lainnya (D dan E). dengan demikian, permukaan yang menghubungkan titik-titik A,C,D,dan E adalah permukaan berkelengkungan ganda.apabila perbedaan tinggi cukup besar, maka permukaan tersebut mempunyai kelengkungan relatif tajam.



Gambar 11-12 Kelengkungan pada membran pratarik

11.4.2 Kondisi Tumpuan

Banyak struktur membran yang ditumpu oleh sederetan titik tumpu diskret. Titik tinggi utama biasanya dibentuk dengan menggunakan kepala (masts) tekan yang cukup besar. Masts seperti ini didesain sebagai kolom besar yang hampir selalu berujung sendi. Titik rendah utama biasanya dihubungkan ke tanah. Gaya vertikal ke atas dan horizontal yang besar biasanya terjadi pada pondasinya karena gaya prategang pada membran diperoleh dengan menaqrisk membran, dengan menggunakan cara jacking, di antara titik timhhi dan titik pengikat ke bawah. Karena ada gaya terpusat yang sangat besar, maka hubungan pada titik pengikat ke bawah merupakan masalah utama dalam desain. Banyak dan penentuan titik tumpuan umumnya menentukan besar gaya yang ada pada titik hubung ditanah atau pada mast, bagaimanapun, kita tidak perlu membuat tumpuan terlalu banyak agar kita dapat memeperoleh kelengkungan membran yang cukup.

Kekecualian mengenai kondisi tumpuan titik utama untuk struktur membran adalah ditepi bebas dari membrab prategang.

Karena tegangan memembran lokal yang akan terjadi di permukaan yang di atas titik tinggi akan sangat besar, maka digunakan celah untuk mengurangi tegangan membran.membran itu terikat pada cincin yang akan mendistribusikan gaya internalsecara lebih rata ke tumpuan-tumpuan titik. Cincin tersebut, pada gilirannya, dihubungkan dengan mast.

11.4.3 Tinjauan lainnya

Permukaan berkelengkungan ganda bukan saja menimbulkan kesulitan teoritis, malainkan juga kesulitan pelaksanaan. Biasanya permukaan demikian dibuat dari jalur-jalur berbentuk tidak merata yang dipotong secara khusus. Penentuan bentuk jalur ini merupakan masalah

tersendiri. Masalah analog juga timbul apabila suatu jaring kabel digunakan untuk struktur berbentuk panjang. Bentuk grid kecil yang dibentuk, tentu saja, tidak selalu berbentuk bujur sangkar atau segi empat, tetapi bentuk-bentuk yang sangat bervariasi. Karena itulah penentuan panjang kabel dan lokasi titik persilangan merupakan masalah yang perlu di perhatikan.

11.5 Prinsip-Prinsip Umum Membran

11.5.1 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.

11.5.2 Struktur Cangkang yang Mempunyai Permukaan Rotasional

Adanya dua kumpulan gaya pada arah yang saling tegak lurus didalam permukaan cangkang berperilaku seperti struktur plat dua arah. Gaya geser yang bekerja diantara jalur-jalur plat yang bersebelahan pada struktur plat planar mempunyai kontribusi dalam memberikan kapasitas pikul beban plat. Hal yang sama juga terjadi 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. Pada pelengkung tidak ada momen lentur apabila bentuk pelengkungnya adalah funicular untuk beban tersebut. Apabila beban yang bekerja hanya sebagian (parsial), pada pelengkung akan timbul momen lentur.

Gaya melingkar (hoop forces) ini berarah tegak lurus dengan gaya meridional. Gaya melingkar menahan jalur meridional dari gerakan kearah keluar bidang yang cenderung terjadi untuk kondisi pembebanan sebagian (lentur pada pelengkung terjadi disertai gerakan). Pada cangkang tekanan yang diberikan oleh gaya-gaya melingkar tidak menyebabkan timbulnya momen lentur dalam arah meridional (juga dalam arah melingkar). Dengan demikian, cangkang dapat memikul variasi beban cukup dengan tegangan-tegangan dalam bidang. Geser plat yang telah disebutkan diatas juga memberikan kontribusi dalam memikul beban.

Cangkang adalah struktur yang unik. Cangkang dapat disebut bekerja secara funicular untuk banyak jenis beban yang berbeda meskipun bentuknya tidak benar-benar funicular. Bentuk funicular untuk pelengkung yang memikul beban terbagi rata adalah parabolic. Cangkang berbentuk segmen bola (tidak parabolik) dapat juga memikul beban dengan gaya-gaya dalam bidang. Gaya meridional pada cangkang yang mengalami beban vertikal penuh selalu adalah gaya tekan (analog dengan gaya yang

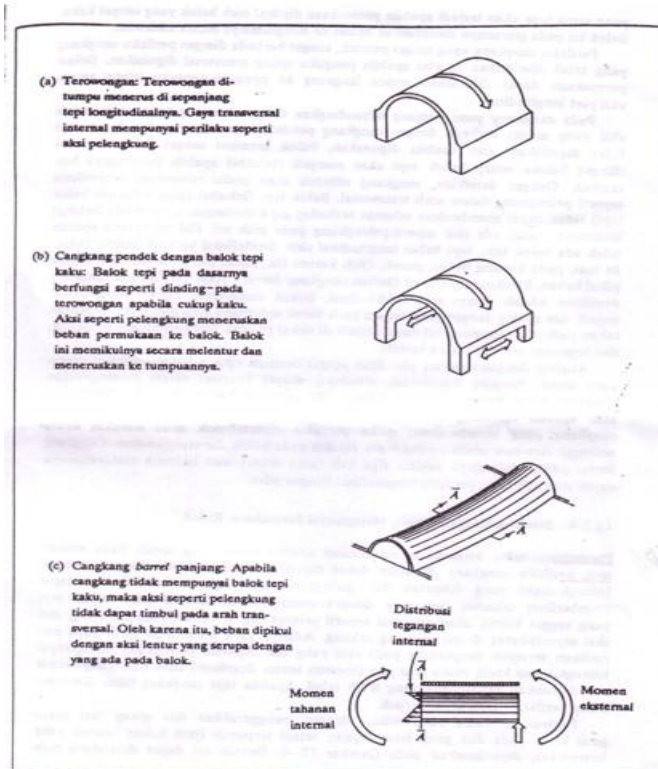
terjadi pada pelengkung). Sedangkan gaya melingkar dapat berupa tarik maupun tekan, bergantung pada lokasi cangkang yang ditinjau.

Tinjauan disain utama pada cangkang putar (shell of revolution) adalah masalah ditumpuannya atau ditepi-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 ditepi bawah cangkang. Pada kubah, misalnya system penyokong melingkar perlu digunakan. Alternatif lain adalah menggunakan cincin lingkaran yang disebut cincin tarik, didasar kubah sehingga dapat menahan komponen keluar dari gaya meridional. Karena gaya yang disebut terakhir ini selalu tekan, maka komponen horizontal selalu berarah keluar. Karena itulah cincin containment selalu mengalami gaya tarik. Seandainya pada puncak cangkang terdapat lubang, maka komponen gaya meridional didasar cangkang akan berarah kedalam sehingga gaya pada cincin adalah gaya tekan.

Lubang pada permukaan cangkang seperti disebutkan diatas mungkin saja ada, tetapi sebaiknya dihindari karena hal ini mengganggu kontinuitas juga mengurangi efisiensi permukaan cangkang. Apabila memang harus ada lubang, cangkang harus secara khusus diperkuat ditepi lubang tersebut. Masalah lain pada cangkang pada derajat kelengkungannya.

11.5.3 Stuktur Cangkang yang Mempunyai Permukaan Translational

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



Gambar 12-5 Cangkang silindris

11.5.4 Struktur Cangkang yang Mempunyai Permukaan Ruled

Permukaan *ruled* biasanya membutuhkan analisis yang lebih rumit. Pada umumnya, perilaku cangkang demikian dapat dipelajari dengan memandangnya sebagai kelengkungan yang dibentuk dari garis-garis lurus. Apabila kondisi tepi dapat memberikan tahanan (misalnya dengan menggunakan fondasi atau balok tepi yang sangat kaku), akan ada aksi seperti pelengkung di daerah yang cembung, dan aksi seperti-kabel di daerah yang cekung. Adanya gaya tekan atau tarik pada permukaan tersebut bergantung pada aksi yang ada. Apabila permukaan mempunyai kelengkungan kecil, maka aksi plat (momen lentur dominan) akan ada, yang berarti membutuhkan penampang yang lebih tebal. Apabila tepi cangkang tidak ditumpu, maka perilaku balok dapat terjadi.

Permukaan *'ruled* yang dibuat dengan menggerakkan dua ujung dari suatu-garis lurus pada dua garis lurus sejajar, tetapi terpuntir (jadi bukan bentuk yang kompleks), Bentuk ini dapat dipandang pula sebagai permukaan translasional yang dibentuk dengan menggerakkan parabola cekung pada parabola cembung. Struktur seperti ini menunjukkan aksi seperti pelengkung pada arah kelengkungan cembung dan aksi seperti kabel pada arah cekung (tegak lurus dari arah cembung). Dengan demikian, medan tegangan pada plat adalah tarik pada satu arah dan tekan pada arah tegak lurus lainnya. Kedua arah ini membentuk sudut 45° dengan garis lurus pembentuk cangkang tersebut.

11.6 ANALISIS DAN DESAIN CANGKANG BOLA

11.6.1 Gaya-gaya Meridional

$$\sum F_v = 0:$$

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

Keterangan :

ϕ = sudut yang mendefinisikan potongan cangkang

a = jari-jari kelengkungan sesaat di titik tersebut

N_ϕ = gaya tekan dalam bidang yang terjadi pada potongan horizontal yang didefinisikan dengan ϕ .

$N_\phi \sin \phi$ = Komponen vertical dari gaya (dianggap merata pada keliling cangkang)

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

Apabila beban per satuan luas yang bekerja ke bawah pada cangkang disebut w , maka keseimbangan dalam arah vertical akan menghasilkan :

$$\sum F_r = 0:$$

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

di mana ϕ_1 dan ϕ_2 mendefinisikan segmen cangkang yang ditinjau. Suku sebelah kiri adalah W .

Untuk $\phi_1 = 0$, maka :

$$N_{\phi} = \frac{Rw}{1 + \cos \phi}$$

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.

Gaya-gaya Melingkar

Gaya-gaya melingkar (hoop forces), yang biasa disebut N_{θ} 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 $p_r = w \cos \phi$. Jadi ekspresi yang menghubungkan gaya melingkar dan meridional adalah :

$$p_r = \frac{T_1}{r_2} + \frac{T_2}{r_2}$$

atau :

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

atau :

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

untuk bola $r_1 = r_2 = R$, dan menyubstitusikan ekspresi N_{ϕ} , maka kita peroleh :

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

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 51.49° diukur dari garis vertical. Potongan cangkang di atas batas ini selalu mengalami tekan, sedangkan di bawahnya dapat timbul tarik dalam arah melingkar. Tegangan-tegangan tersebut selalu relatif kecil.

Gaya Terpusat

Alasan mengapa beban terpusat harus dihindari pada struktur cangkang dapat terlihat jelas dengan menganalisis gaya-gaya meridional yang ditimbulkan oleh beban tersebut Ekspresi umum yang telah kita peroleh sebelum ini adalah $N_{\phi} = W / 2\pi R \sin^2 \phi$ di mana 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 di bawah beban itu menjadi tak hingga (untuk $\phi = 0$, maka $\sin \phi = 0$ dan $N_{\phi} = \infty$). Jelas hal ini dapat menyebabkan terjadinya keruntuhan apabila



permukaan cangkang tidak dapat memberikan tahanan momen dan beban tersebut memang benar-benar terpusat. Dalam segala hal, sebaiknya beban terpusat dihindari pada struktur.

Seperti yang terjadi pada struktur-struktur lain, kondisi tumpuan kubah sangat mempengaruhi perilaku dan desain struktur. Secara ideal, tumpuannya tidak boleh menimbulkan_ momen lentur pada permukaan cangkang. Jadi, kondisi jepit harus dihindari.

Tinjauan utama pada desain fondasi adalah bagaimana menyerap gaya tendangan horizontal yang diasosiasikan dengan komponen berarah ke dalam dari gaya meridional dalam bidang. Untuk itu dapat digunakan sistem penyokong (*buttresses*).

Cara lain untuk mengatasi gaya horizontal adalah dengan menggunakan cincin tarik. Cincin tarik ini 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 $T = (N_\phi \cos \phi)a$ di mana a 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 memikul gaya vertikal.

Tinjauan-tinjauan Lain

Banyak faktor yang harus ditinjau dalam desain 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 kelengkungan tajam ini tentu saja menyebabkan kita tidak dapat menggunakan cangkang berprofil rendah dan berbentang besar (cangkang dengan kelengkungan kecil). Masalah ini juga terjadi pada cangkang yang terbuat dari elemen-elemen linear kaku (misalnya kubah geodesik). Pembaca dapat mempelajari literatur lain yang membahas masalah tekuk cangkang dan menerapkannya dalam desain.

Masalah lain yang juga penting diperhatikan adalah cangkang harus mampu juga menahan beban-beban yang berarah tidak vertikal Gambar 12-15 mengilustrasikan trajektori tegangan pada kubah bola akibat beban angin. Biasanya beban angin bukan merupakan masalah kritis dalam desain struktur cangkang. Beban gempa, yang juga berarah lateral seperti beban angin, dapat menimbulkan masalah serius dalam desain. Apabila ada beban tersebut, kita harus berhati-hati dalam mendesain kondisi tumpuan cangkang.