

Struktur Bentang Lebar

Sistem Struktur Bentuk Aktif
(*Form Active Structural System*):

Struktur Pneumatic

M. Agung Wahyudi, ST.MT.

Prodi Arsitektur Fakultas Teknik & Informatika
Universitas PGRI Semarang

Pengertian

Struktur pneumatik adalah suatu sistem struktur yang memperoleh kestabilannya dari tekanan internal yang lebih tinggi dibandingkan dengan tekanan eksternal.

Pada struktur ini semua gaya yang terjadi pada membran berupa gaya tarik, yang terjadi karena perbedaan tekanan udara di dalam struktur pneumatic dengan tekanan udara di luar.

Membran yang merupakan bahan dasar dari sistem struktur pneumatik ini dapat diberi pra tegang dengan tekanan dari sebelah dalam apabila menutup suatu volume atau sejumlah volume yang terpecah-pecah.

Media yang digunakan dapat bermacam-macam, diantaranya zat cair, busa atau butiran. Namun yang paling banyak digunakan adalah media gas atau udara



Sejarah Perkembangan

Prinsip yang digunakan pada sistem struktur pneumatik dengan media gas atau udara adalah sama dengan prinsip yang berlaku pada balon udara, dimana tekanan udara internal di dalam balon lebih tinggi dibandingkan tekanan udara di luarnya. Dari keberhasilan penerapan dalam sarana transportasi manusia mendorong dirinya untuk menerapkannya juga pada bangunan arsitektural. Pelopor sistem struktur pneumatik pertama kali adalah seorang *engineer* asal Inggris yang bernama **Sir William Lanchester**, yang berhasil mendesain sebuah *field hospital* pada tahun 1917. Lanchester mendesain sebuah bangunan pameran pneumatik berdiameter 300 m yang disokong oleh tekanan udara dan ditarik oleh sebuah jaringan kabel bersama dengan adiknya seorang arsitek.

Sejarah Perkembangan

Buckminster Fuller adalah orang yang telah mengambil peran dalam sistem struktur pneumatic dengan mengembangkan dan mempropagandakan struktur tersebut, namun dia bukanlah seseorang yang merealisasikan bangunan yang menggunakan

Orang pertama yang merealisasikannya adalah seorang insinyur bernama **Walter Bird**, dimana beliau mendesain antenna radar sebagai struktur bantalan pneumatic di atas cincin baja.



Sejarah Perkembangan

Sampai saat ini struktur pompa lebih sering digunakan (Wolfgang Schueller, 1989) karena biayanya lebih murah, ranangan dan pengemasannya lebih sederhana, dan membran tersedia memadai. Akan tetapi, struktur ini mempunyai potensi paling besar untuk diterapkan pada bangunan tinggi, bukan hanya karena kemampuannya untuk berdiri sendiri, melainkan karena kemampuannya untuk menunjang struktur lain.

Penerapan struktur pneumatik di Indonesia, khususnya untuk bangunan arsitektural hingga saat ini belum banyak dilakukan. Kendala yang dihadapi adalah jenis struktur ini masih kurang populer yang diikuti dengan kurangnya nara sumber serta belum adanya peraturan-peraturan yang khusus mengatur pembangunan menggunakan struktur pneumatik.

Sejarah Perkembangan

Padahal dari banyak sisi, Indonesia sebenarnya merupakan lahan yang subur bagi pengembangan struktur pneumatik. Rehm tropis di Indonesia memungkinkan bangunan terbebas dari beban salju yang merupakan musuh utama struktur pneumatik. Selain itu di Indonesia banyak event yang pengadaannya berkesesuaian dengan karakter struktur pneumatik. Pengadaan material utama bangunan berupa kain 1)cl-lapis PVC juga sudah bukan merupakan barang baru di industri pertekstilan Indonesia

Pengamatan yang lebih mendalam dari struktur *advance pneumatic* didapat dari sebuah riset doctoral di Department of Architectural Science di University of Sydney, Australia yang dilakukan oleh Henry J. Cowan dan Jens G. Pohl dari University of New South Wales. Struktur pneumatik ini dikembangkan ke arah vertikal, untuk bangunan bertingkat menengah (*Medium Rise Building*).

Prinsip Kerja Pneumatic

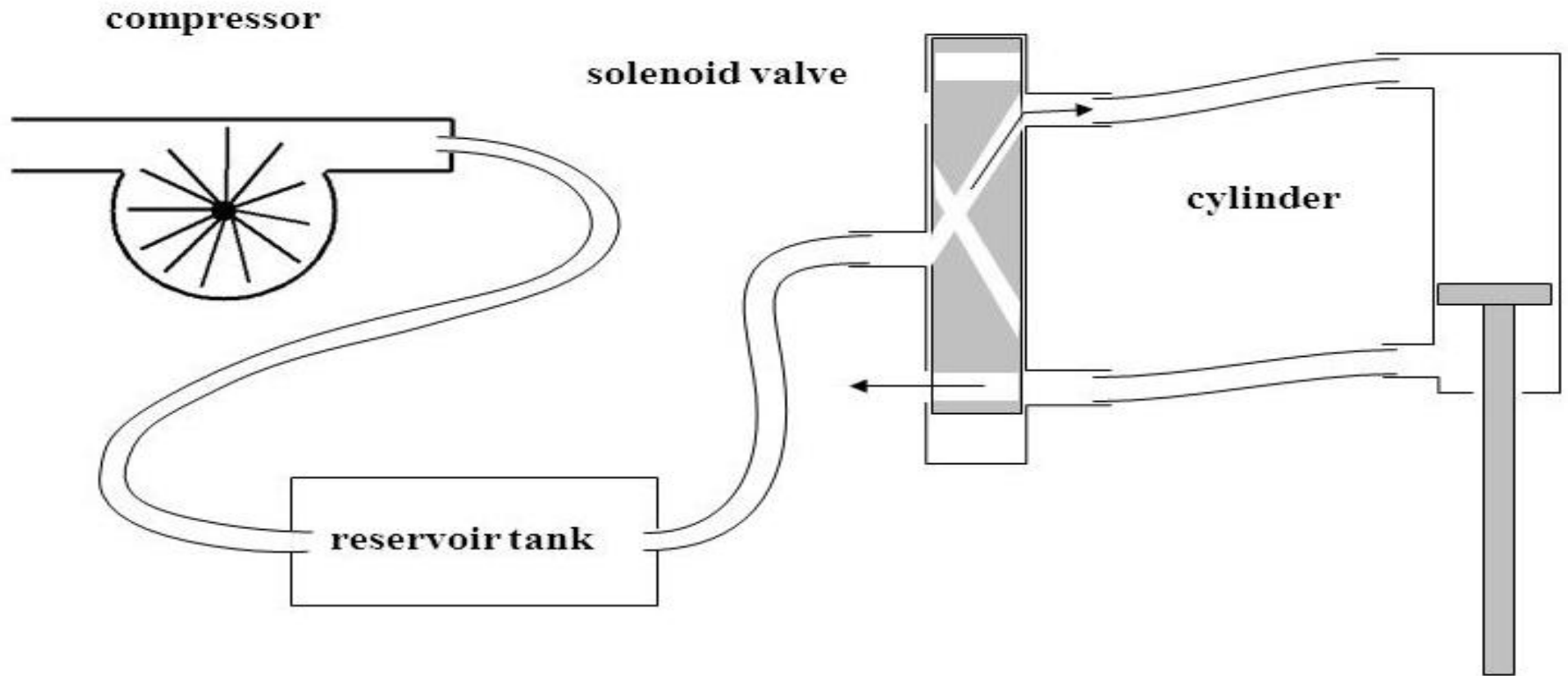
- Struktur yang dipompa dengan udara membentuk bagan-bagan struktur konvensional (dinding, balok, kolom, busur, dsb). Kekakuan bagan-bagan dihasilkan melalui tekanan udara yang terdapat di dalam bentukan membran (30-40 psf), dibandingkan dengan tekanan dan ban mobil kira-kira 4.300 psf).
- Struktur yang didukung oleh udara menggunakan tekanan positif rendah (3-6 psf) untuk mendukung membran dengan luas tertentu. Udara harus dipasok secara terus menerus karena adanya kebocoran, terutama pada pintu-pintu masuk bangunan.

Prinsip Kerja Pneumatic

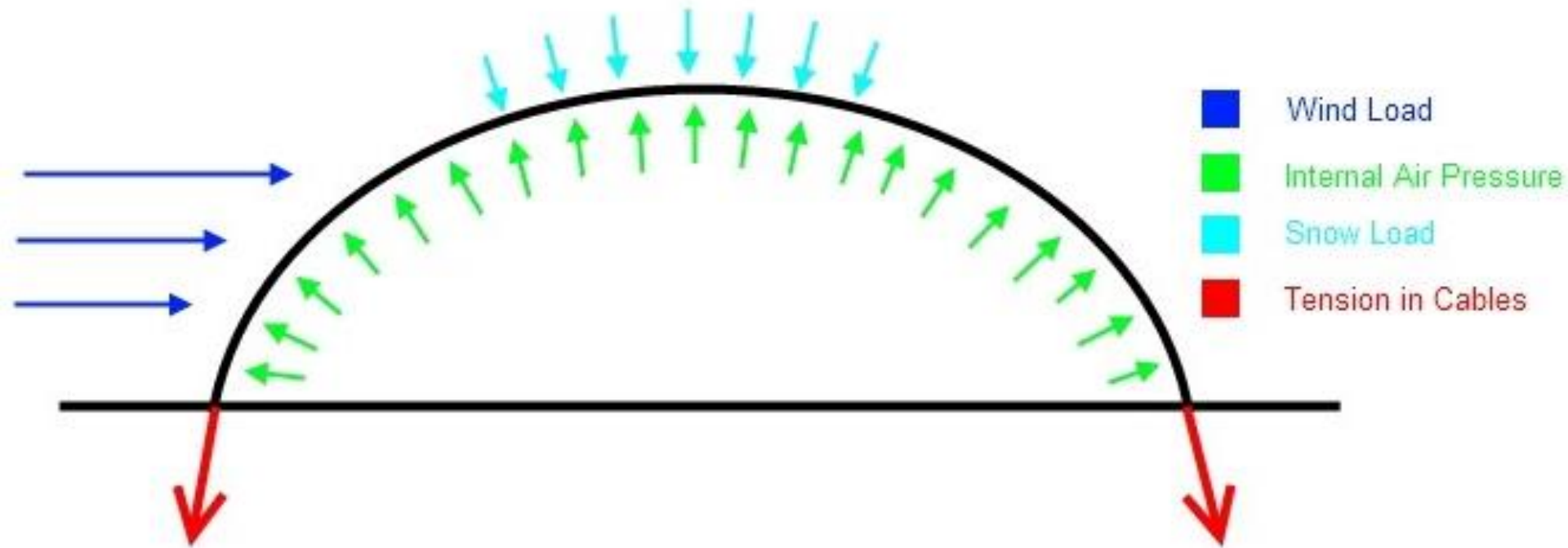
Karakter dari struktur pneumatik adalah murah dalam investasi awal, cepat pembangunannya dan ringan bobotnya karena material utamanya adalah lembaran kain dengan tebal tidak lebih dari 0,5 mm.

Sistem struktur ini membutuhkan angkur pengikat membran ke tanah dan membutuhkan sistem pencegahan kebocoran. *Air Supported Structure* mampu mencapai bentang lebih besar dibandingkan dengan *Air Inflated Structure*.

Prinsip Kerja Pneumatic



Prinsip Kerja Pneumatic



Jenis Struktur Penumatic

Struktur Penumatic dapat dibagi dalam 3 kelompok:

1. Struktur yang ditumpu Udara (*Air Supported Structure*)
2. Struktur yang ditiupkan (*Air Inflated Structure*)
3. Struktur Campuran (*Hybrid Air Structure*)



1. Struktur yang ditumpu Udara (*Air Supported Structure*)

- Disebut juga *Anti Gravity Structures*, bentuknya mengembang seperti tirai yang melingkupi udara bertekanan. Bentuk-bentuknya lebih terbatas daripada *Air Inflated Structure*.
- Hanya menggunakan satu lapis membran dan membutuhkan tekanan udara yang rendah (*low pressure system*).
- Membutuhkan sedikit perbedaan tekanan udara untuk mengangkat membrannya (2-20 Psf di atas tekanan atmosfer)
- Memperbesar radius kurvatur akan menambah kekuatan membran

1. Struktur yang ditumpu Udara (*Air Supported Structure*)

- Struktur ini dirancang untuk dapat mengantisipasi pengaruh angin, mengingat beban angin paling besar pengaruhnya.

$$T = (P1 \cdot R) / 2,$$

dimana T = tegangan

P1 = tekanan udara didalam

R = radius kurvatur

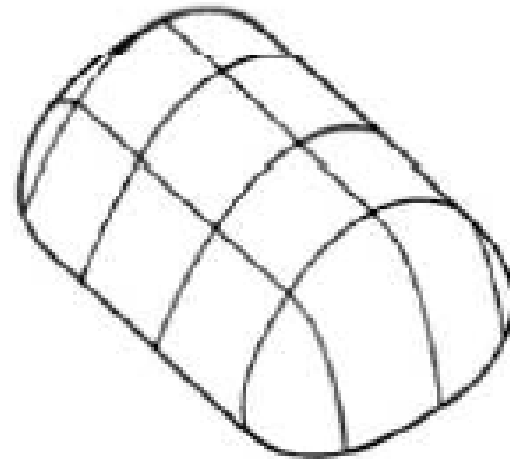
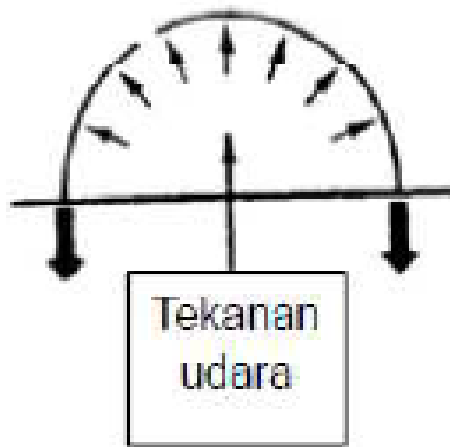
- Tekanan udara harus kontinu & konstan. Untuk memompa udara digunakan *blower* (biasanya *automatic blower* agar langsung memompa jika tekanan udara turun)
- Pembuatan lubang bukaan harus diperhitungkan agar tekanan udara tidak turun secara mendadak.



1. Struktur yang ditumpu Udara (*Air Supported Structure*)

- Untuk menjaga bentuk struktur, harus diperhatikan:
 - ✓ Kontinuitas tekanan udara
 - ✓ Joint dengan struktur lain (busur/rangka)
 - ✓ Memperkuat struktur dengan jaringan/net/kabel.
- Sistem *Air Supported Structure* membutuhkan angkur pengikat ke tanah dan sistem pencegah kebocoran.
- Bentang yang bisa dicapai lebih panjang daripada sistem *Air Inflated Structure*.

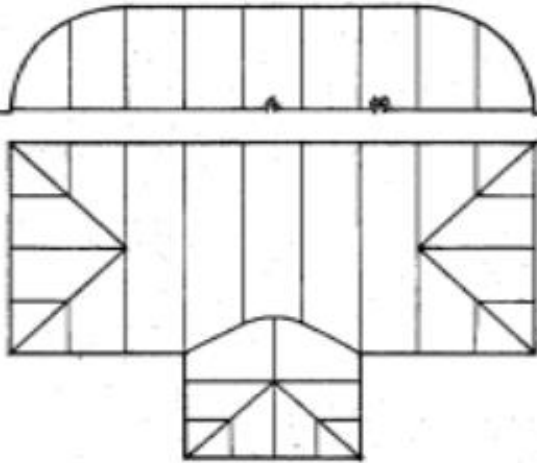
1. Struktur yang ditumpu Udara (*Air Supported Structure*)



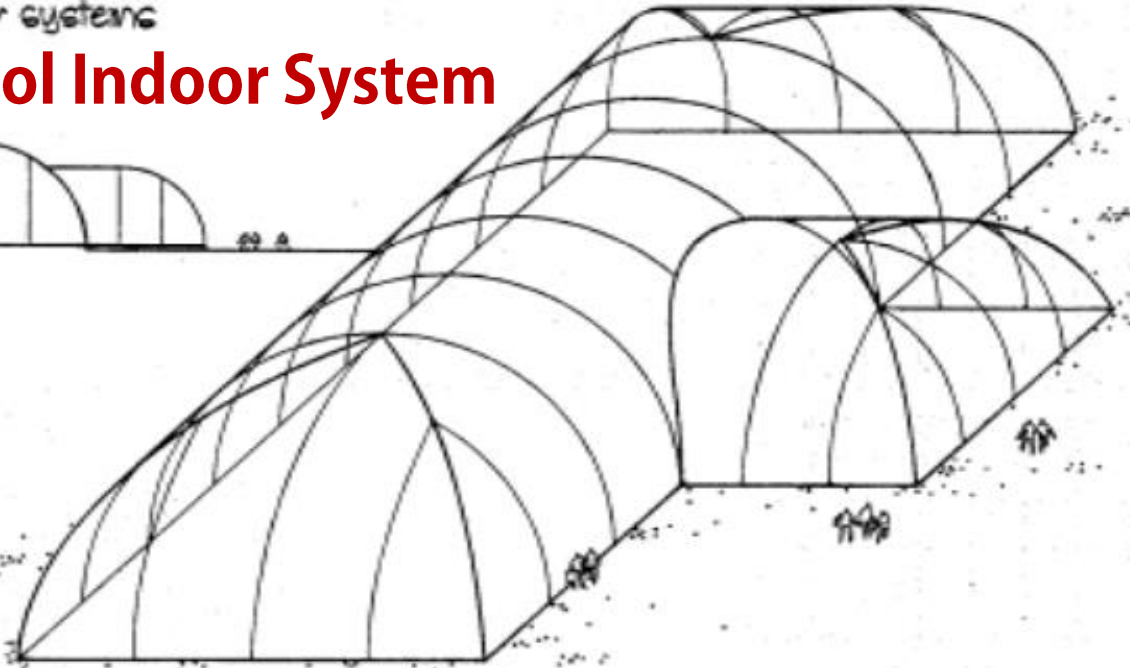
Gambar 1. Struktur yang ditumpu udara (air supported structure)

Sumber : Schodeck, 1980

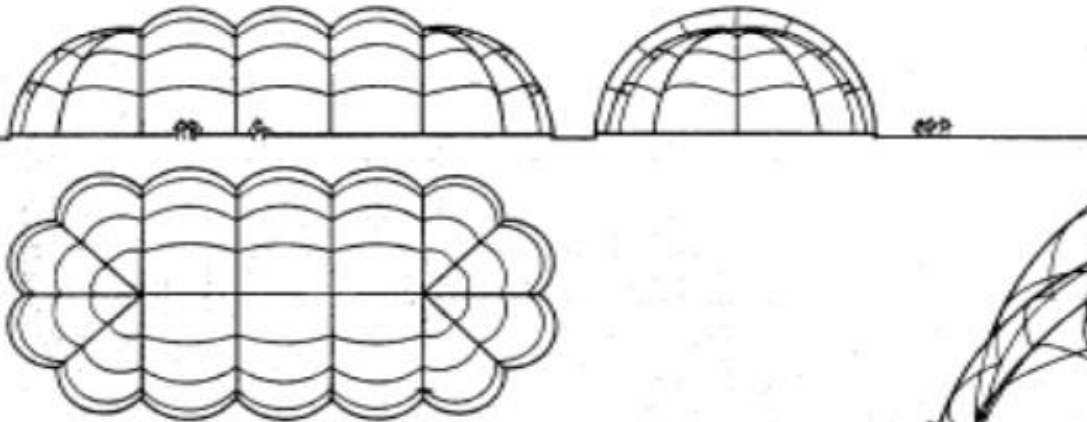
Air Control Indoor System



Zylindrische Membranen als primäre Tragelemente
Cylindrical membranes as primary structural elements

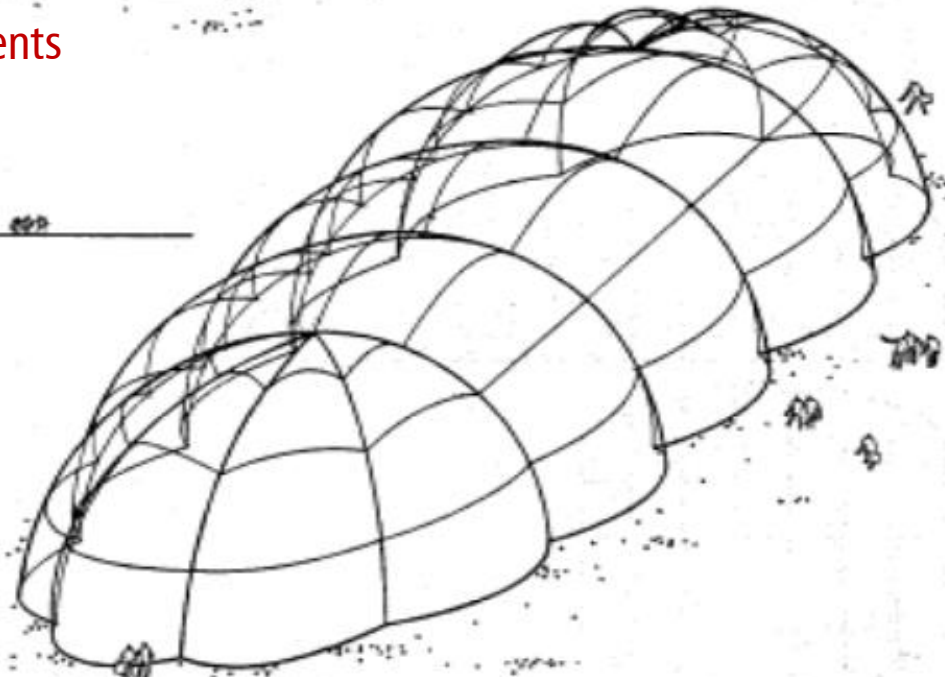


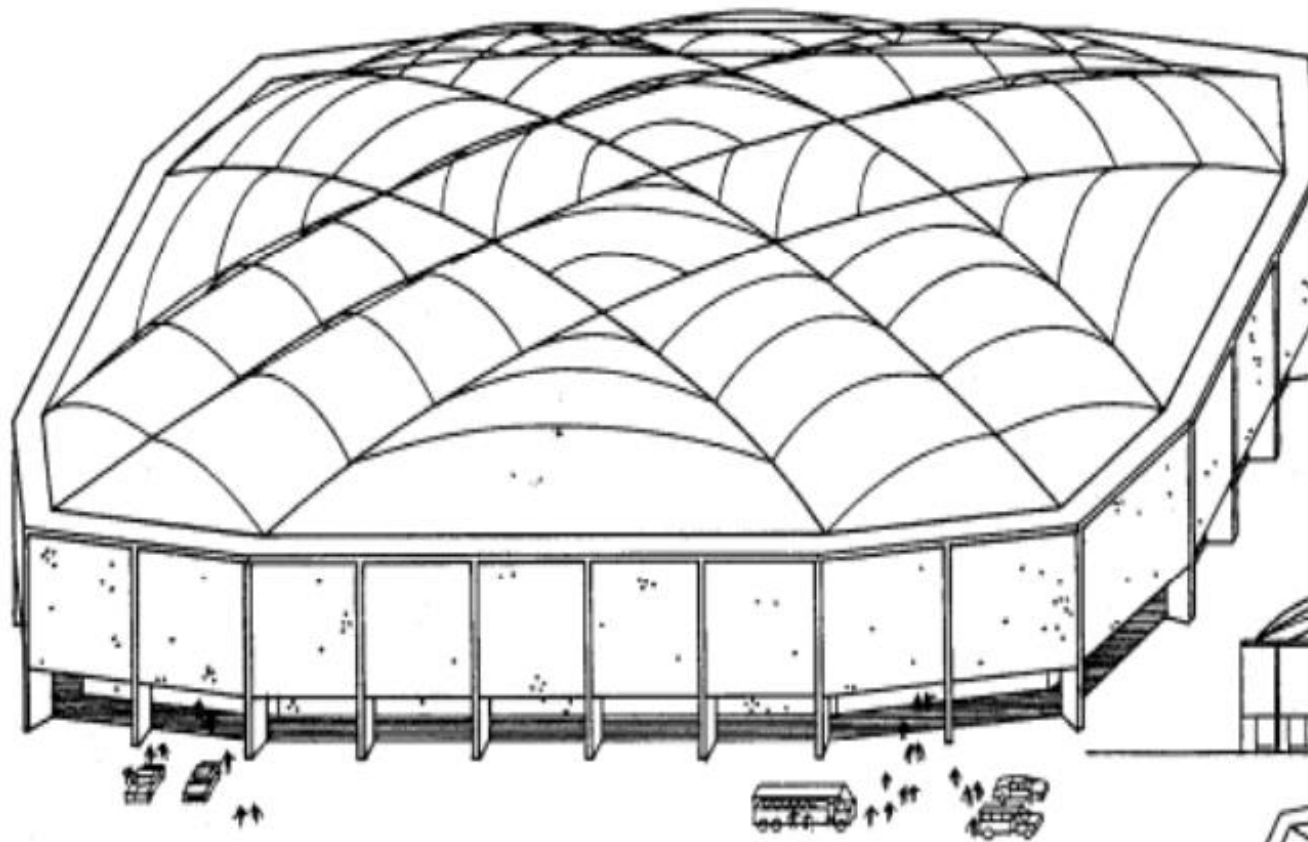
Cylindrical Membrane as primary structural elements



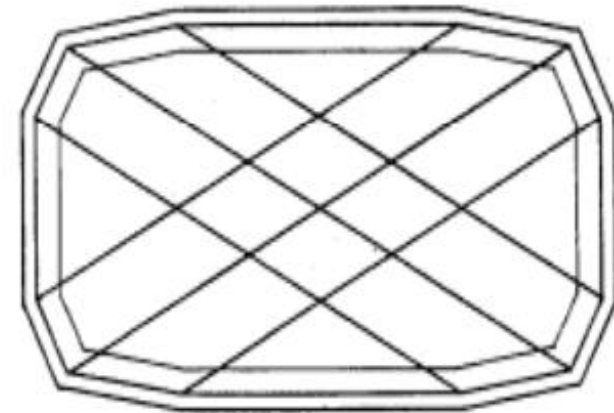
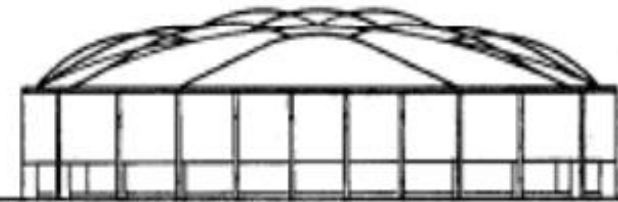
Torusmembranen zwischen gestrichelten Lastkabeln
Torus membranes between load cables in row formation

Torus Membrane between load cables in row formation





Membrane mit Einzelsell-Abspannung
Membrane with single-cable restraining



Struktur Membran dengan *Single Cable Restraining*

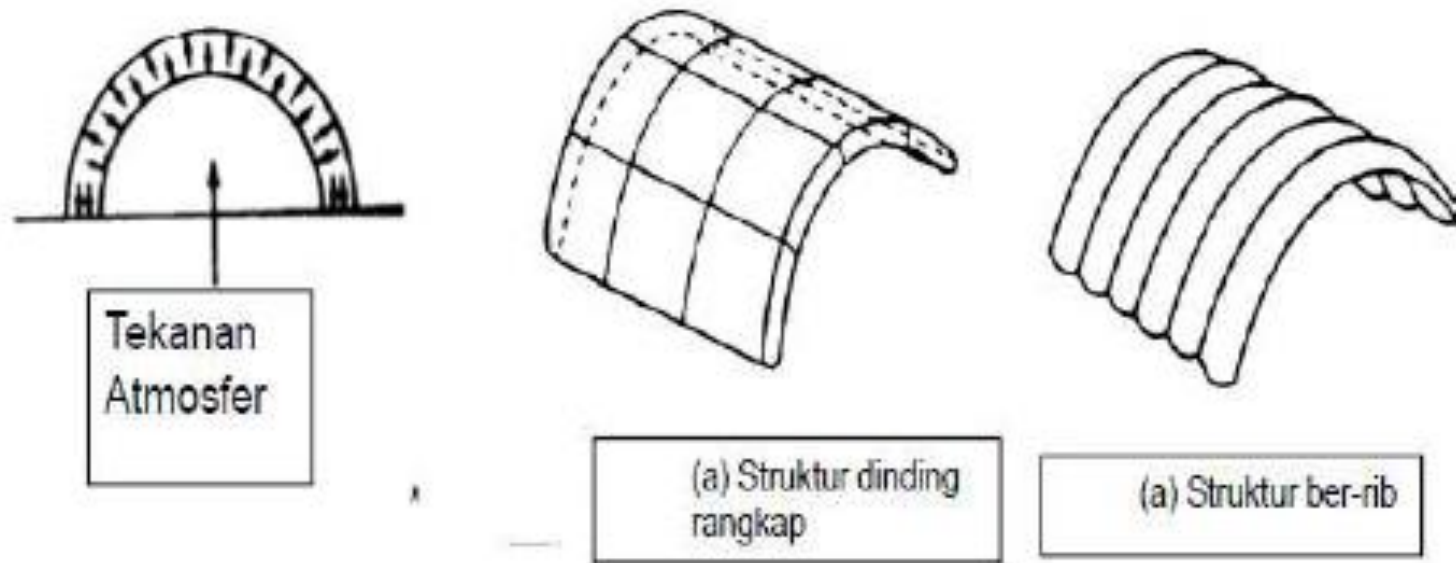
2. Struktur yang digelembungkan (*Air Inflated Structure*)

- Membutuhkan 2 lapisan membran dan membutuhkan tekanan udara yang lebih besar (*high pressure system*)
- Tekanan udara pada sistem ini hanya diberikan kepada strukturnya (tidak membutuhkan *air lock*)
- Elemen dalam sistem ini bersifat rigid/kaku, sehingga lebih tahan terhadap tekuk & lendutan (momen) dibanding sistem *Air Supported Structure*.
- Membutuhkan tekanan udara sebesar 2-100 psf (0,2 – 7 atm)
- Membutuhkan material membran yang kuat dan kedap udara
- Perilaku struktur dengan sistem ini sangat kompleks, sehingga sampai sekarang belum diketahui prosedur perancangan yang tepat

2. Struktur yang ditiupkan (*Air Inflated Structure*)

- Kontinuitas pasokan udara tidak diperlukan, tidak seperti sistem *Air Supported Structure*
- Tekanan udara hanya diberikan kepada *space* bangunan, sehingga pemakai bangunan tidak berada dalam tekanan udara.
- Jadi sistem ini lebih bebas dipakai sebagai penutup *space*, karena tidak membutuhkan *air lock* & peralatan lain agar struktur tetap berdiri.
- *Air Inflated Structure* ini terbagi dalam 2 jenis, yaitu:
 1. *Tubular System (Line Elements)* : seperti kolom, balok, busur & kombinasinya.
 2. *Dual-Wall System/Airmats (Surface Elements)* : dinding, lempeng atau shell.

2. Struktur yang ditiupkan (*Air Inflated Structure*)



*Gambar 2. Struktur yang ditiupkan udara
(air inflated structure)*

Sumber : Schodeck, 1980

2. Struktur yang ditiupkan (*Air Inflated Structure*)



2. Struktur yang ditiupkan (*Air Inflated Structure*)



stadion michigan, 1975

2. Struktur yang ditiupkan (*Air Inflated Structure*)



Megadome stadium





3. Struktur Campuran (*Hybrid Air Structure*)

- Sistem ini merupakan sistem struktur pneumatic yang digabung dengan struktur *rigid frame*, digantung & diberi rangka kaku.
- Bisa juga merupakan penggabungan 2 sistem struktur pneumatic.
- Pada sistem ini tekanan internal dari struktur utama harus bertekanan lebih tinggi daripada struktur yang ada di luarnya.

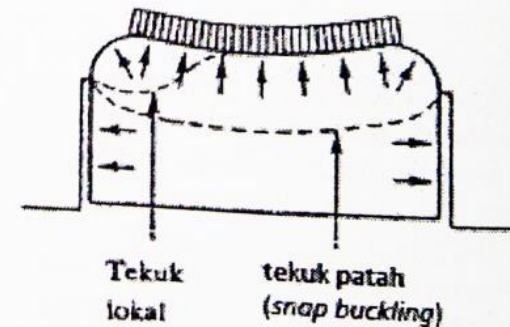
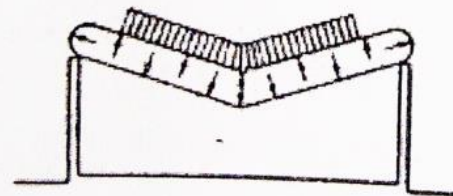
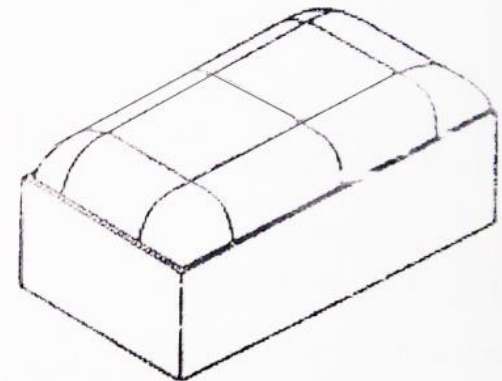
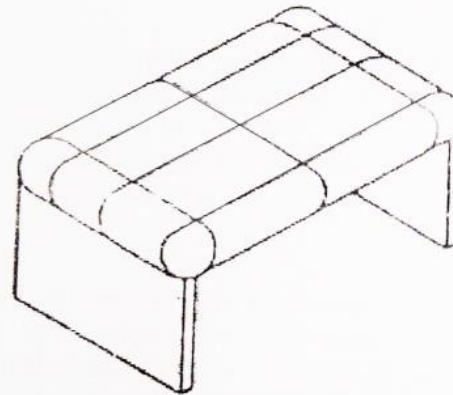
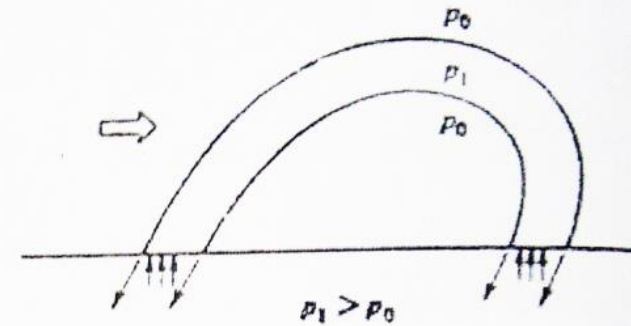
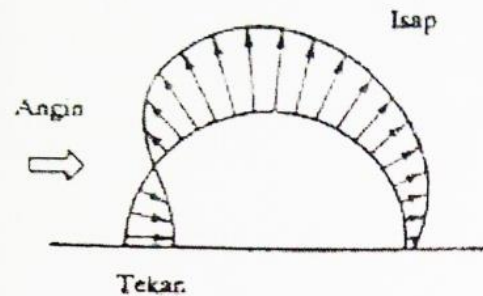
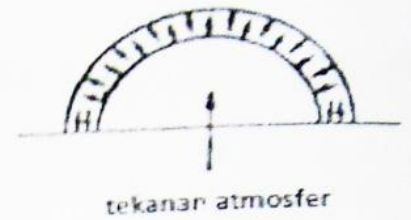
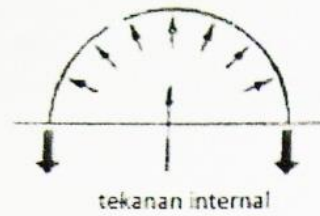
Stabilitas Bentuk Konstruksi Struktur Pneumatic

Tidak hanya beban internal yang berpengaruh dalam sistem struktur pneumatik, ada juga beban eksternal yang dapat menyebabkan deformasi, yaitu angin dan salju.

Ketika sistem mengalami beban terpusat yang besar, hal itu akan menyebabkan tegangan lokal yang sangat besar sehingga harus diantisipasi dengan baik, contohnya yaitu ketika ada seseorang yang berjalan di atas atap untuk memperbaiki bagian yang bocor.

Salah satu cara untuk mengatasi beban angin yang dapat menyebabkan deformasi adalah dengan membuat bangunan pneumatik terlalu tinggi.

Stabilitas Bentuk Konstruksi Struktur Pneumatic



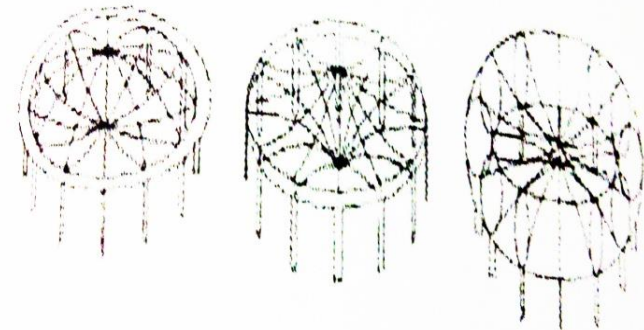
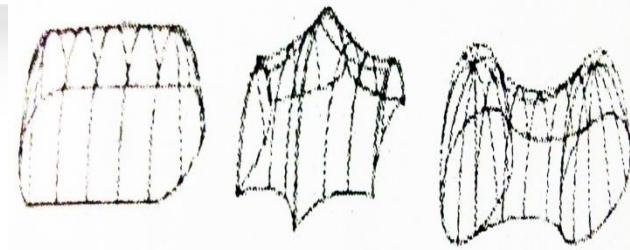
Material pada Struktur Pneumatic

Material sistem struktur pneumatik dapat menggunakan material PVC (*polyvinyl chloride*), yang memiliki titik lebur yang tinggi ketika dicampurkan dengan *polyethylene*. Kedua material yang digabungkan tersebut akan memiliki titik lebur antara 100 -150 derajat celcius. *Polyethylene* sendiri memiliki titik lebur 341 derajat celcius dan *polyvinyl chloride* 391 derajat celcius.

Selain itu, memberi lapisan *polyurethane foam* juga dapat digunakan untuk melapisi bidang-bidang membran sehingga tidak mudah terbakar oleh api. Material lain yang dapat digunakan juga adalah PTFE (*polytetrafluoroethylene*), *silicon coated fiberglass*, dan ETFE (*ethylene tetrafluoroethylene*).

Klasifikasi Sistem Struktur Pneumatic secara Umum

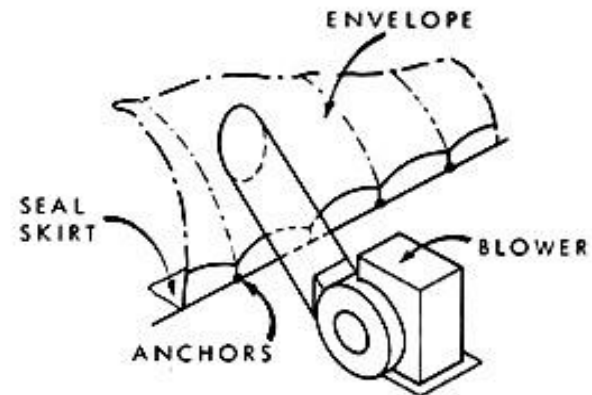
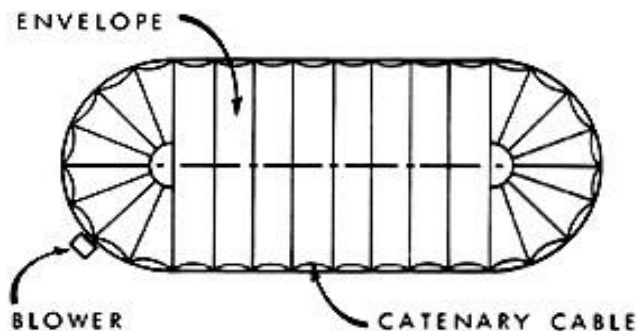
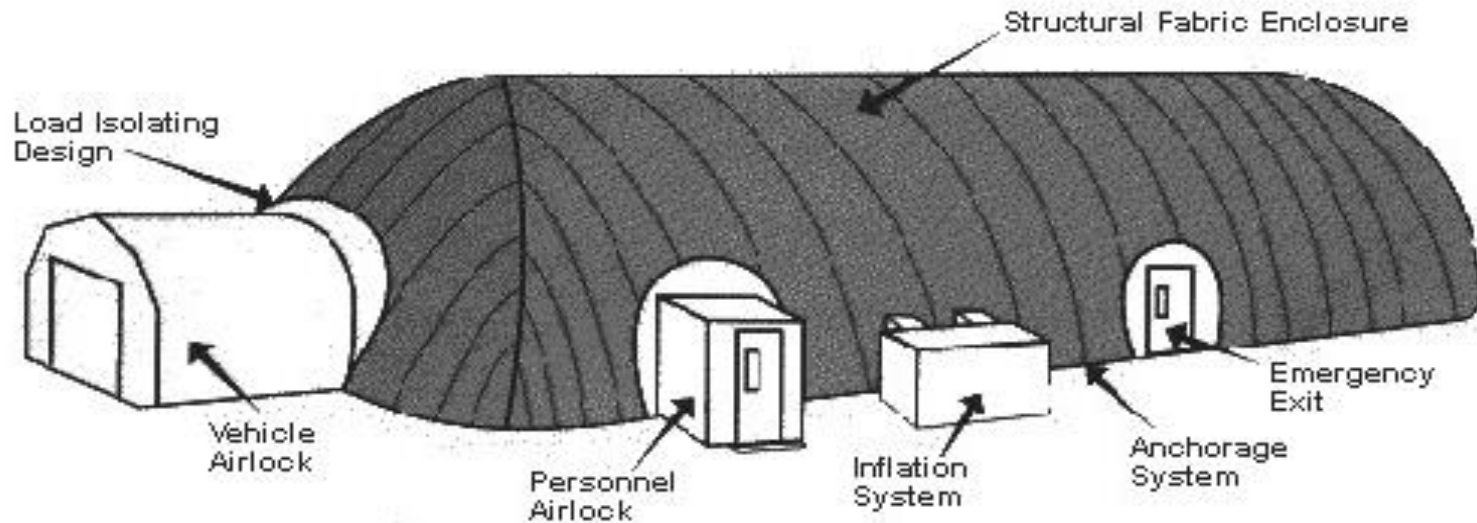
- **Air controlled indoor system**
 - Pressurized air (udara bertekanan)
 - Negative pressure
 - Positive and negative pressure
- **Air cushion system**
 - Pressurized air (air bertekanan)
 - Negative pressure
- **Air tube system**
 - Structure space envelope
 - Load bearing skeleton



Detail-detail Sistem Struktur Pneumatic

- Prinsip sistem struktur pneumatik adalah gabungan antara membran dan kabel, namun tidak semua bangunan pneumatik menggunakan sistem penghawaan (HVAC) yang membuat pneumatik dapat tetap menggembung
- Tekanan udara yang terdapat pada sistem struktur pneumatik diatur oleh sistem HVAC melalui penggunaan kipas, saluran udara, atau kompresor.
- Kipas akan meniupkan udara melalui saluran udara ke dalam membran, dan kompresor memungkinkan untuk mengatur udara di dalamnya.
- Tekanan udara di dalam membran akan dipertahankan oleh sistem HVAC untuk menstabilkan struktur pneumatik dan memungkinkannya untuk berdiri tegak.

Detail-detail Sistem Struktur Pneumatic





Kelebihan Struktur Pneumatic

- Mudah pembangunanya dan cepat
- Ringan
- Temporer
- Tahan terhadap gaya tarik
- Aman
- Ketersediaan yang tak terbatas
- Bersih
- Pemindahan daya dan kecepatan sangat mudah diatur
- Dapat disimpan
- Mudah dimanfaatkan



Kekurangan Struktur Pneumatic

- Kurang tahan terhadap kebocoran
- Mudah sobek
- Tidak menahan beban vertical
- Rawan tertiuap angin
- Memerlukan instalasi peralatan udara
- Mudah terjadi kebocoran
- Menimbulkan suara bising
- Mudah mengembun

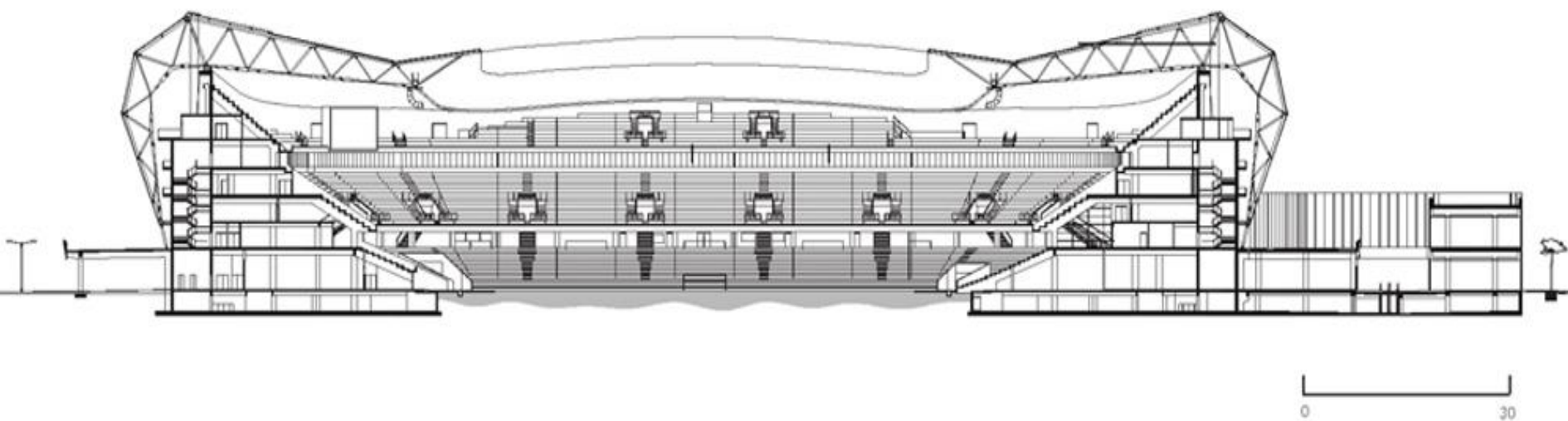
Studi Kasus:

1. Allianz Arena



Allianz Arena adalah sebuah stadion sepak bola yang berkapasitas 69.901 orang, didesain oleh arsitek **Herzog & de Meuron**. Stadion ini dibangun pada tahun 2002-2005 di Munich, Jerman. Fasad dan atap menggunakan struktur pneumatic yang tersusun dari 2.874 *ETFE-foil panel* udara yang terus digembungkan dengan udara kering. Dari kejauhan, panel-panel tersebut akan terlihat berwarna putih. Tetapi jika diperhatikan dengan seksama, ada bintik-bintik hitam pada panel yang memiliki ketebalan 0,2 mm tersebut. Tiap panel dapat dinyalakan dengan lampu warna putih, merah, atau biru muda.





Studi Kasus:

2. Tokyo Dome

(Air Supported Structure)

Lokasi : Koraku 1-chome, Bunkyo, Tokyo, Jepang

Fungsi : Stadion musik dan olahraga

Kapasitas : 55.000 orang

Luas Lantai : 115.221 m²



Studi Kasus:

2. Tokyo Dome

SISTEM STRUKTUR

Tokyo Dome strukturnya campuran dari sistem **rangka** (bagian fasad) dan sistem **pneumatic** (bagian atap). Di atap, membran dibuat menggelembung dengan meningkatkan tekanan udara di bagian dalam lebih 0.3% dari tekanan udara di luar.

MATERIAL MEMBRAN

Material atap dari **membran fiberglass** yang diperkuat **kabel baja prategang**. Permukaan membran dilapisi **teflon**, agar tahan dari kotoran. Keistimewaan struktur ini adalah pencahayaan buatan tidak diperlukan lagi pada siang hari karena lapisan membran yang digunakan memungkinkan cahaya menyinari ruang, namun tidak menghasilkan bayang-bayang.

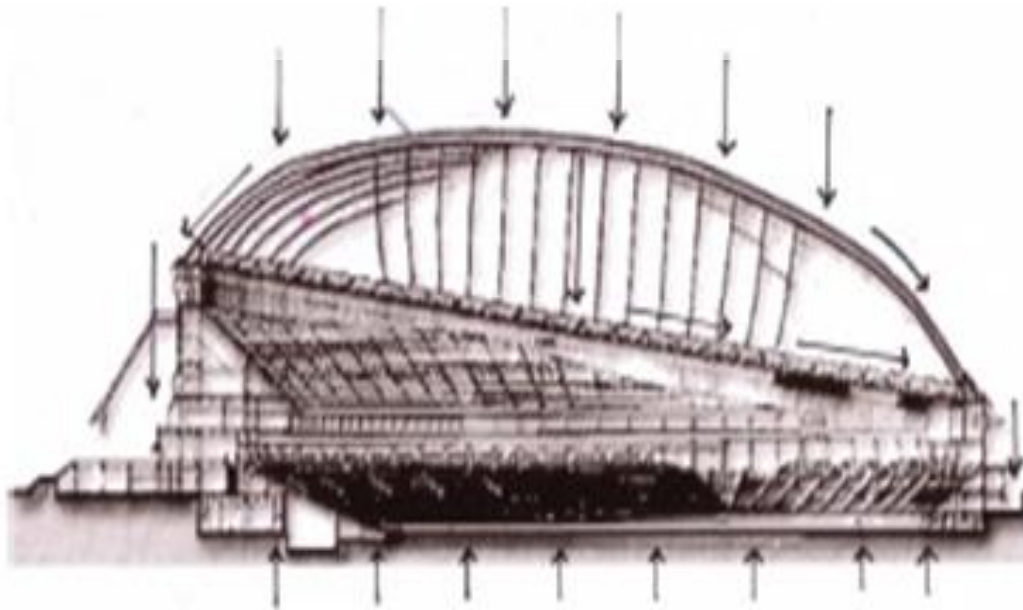
Studi Kasus:

2. Tokyo Dome

PENYALURAN BEBAN

Tuntutan fungsi bangunan stadion tidak memungkinkan ada kolom di tengah, sehingga digunakan sistem struktur membran.

Arah penyaluran gaya Tokyo Dome disesuaikan dengan geometri ruang yang dinaunginya. Hal ini mempengaruhi penempatan arah labran yang berfungsi sebagai penyalur beban ke dua kolom penumpu utama, yang menuju ke pondasi rakitan. Penggunaan pondasi rakit merupakan pilihan yang lebih ekonomis daripada penggunaan pondasi tiang pancang.



Studi Kasus:

3. Louis-Riel Secondary Public School (Air Inflated Structure)

Lokasi : Ottawa, Ontario

Fungsi : Sports & recreation venue



Studi Kasus:

3. Louis-Riel Secondary Public School (Air Inflated Structure)

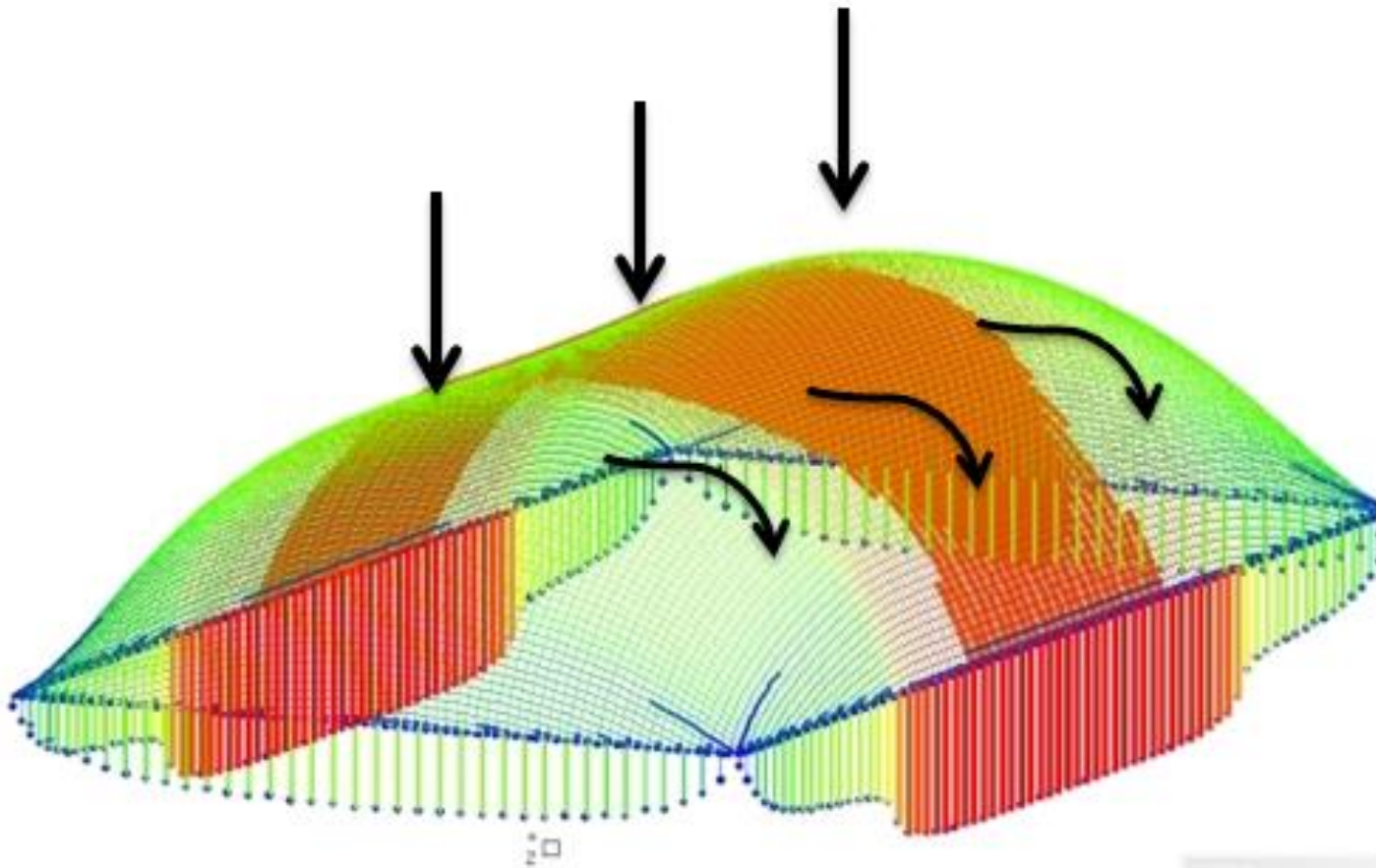
Bangunan ini termasuk ke dalam struktur *air inflated* karena menggunakan membran yang berlapis, dimana membran tersebut memperkuat struktur bangunan itu sendiri.



Studi Kasus:

3. Louis-Riel Secondary Public School (Air Inflated Structure)

Penyaluran beban





Studi Kasus:

3. Louis-Riel Secondary Public School (Air Inflated Structure)

MATERIAL PENUTUP

Struktur ini menggunakan material tembus pandang yang ringan, kedua sisinya dilapisi oleh lapisan akrilik yang untuk tidak menggunakan penerangan pada siang hari (hemat biaya listrik). Untuk memperkuat struktur, digunakan material pendukung dari baja galvanis yang menyambung sampai ke tanah.

LAPISAN DALAM

Untuk menginsulasi struktur dan meningkatkan akustik ruangnya, perbedaan tekanan diatasi dengan lapisan tambahan dari **PVC** dari dalam struktur ini.

Studi Kasus:

4. Ark Nova

(Air Inflated Structure)

Lokasi : Kota Matsushima, Prefektur Miyagi, Jepang
Fungsi : Concert Hall
Arsitek : Arata Isozaki
Kapasitas : 500 – 700 orang penonton



Studi Kasus:

4. Ark Nova

(Air Inflated Structure)

INTERIOR





Terima kasih....