

Struktur Bentang Lebar

Sistem Struktur Vektor Aktif
(*Vector Active Structural System*):

Struktur Rangka Ruang (*Space Frame*)

M. Agung Wahyudi, ST.MT.

Prodi Arsitektur Fakultas Teknik & Informatika
Universitas PGRI Semarang

Struktur Rangka Ruang

Pengertian

Struktur tiga dimensi yang mencakup sistem diikat dalam dua arah di mana anggota berada dalam ketegangan atau kompresi saja. istilah *space-frame* meliputi koneksi terjepit dan kaku (Hardi, 2003)

Sistem konstruksi rangka dengan suatu sistem sambungan antara batang/ *member* satu sama lain yang menggunakan bola/ *ball joint* sebagai sendi penyambungan dalam bentuk modul-modul segitiga agar mudah dipasang, dibentuk, dan dibongkar kembali.

Struktur Rangka Ruang

Sebuah Rangka Ruang atau Struktur Ruang adalah suatu struktur yang ringan, kaku mirip *truss* yang dibentuk dari batang-batang saling mengunci dalam suatu pola geometris. Rangka ruang dapat digunakan untuk menutup daerah yang luas dengan penopang interior yang sedikit.



Karakteristik Space Frame

- Merupakan struktur 3 dimensi
- Elemen lurus yang telah dirakit diatur untuk menyalurkan beban.
- Membuat bentuk permukaan rata atau lengkung.
- Dirancang tanpa kolom di tengah untuk menciptakan daerah terbuka yang luas

Sejarah *Space Frame*

- Space Frame secara bebas sudah dikembangkan oleh Alexander Graham Bell sekitar th 1900 & Buckminster Fuller di th 1950. Fokus Buckminstre Fuller adalah struktur arsitektur & karyanya memnpunyai pengaruh yang luas.
- Space Frame dikembangkan di California selama 1960 dan diperkenalkan ke Afrika Selatan th 1982.
- Khusus dikembangkan untuk kondisi tanah yang tidak stabil, panelnya membentuk struktur monolit yang menawarkan kekuatan dinding paling unggul yang tanpa terjadi retakan.

Sejarah *Space Frame*

- *Space Frame* dirancang secara khas menggunakan matriks kaku. Sifat khusus kekakuan matriks dalam rangka ruang arsitektural adalah keleluasaan faktor sudut. Jika sambungan cukup kaku, pembelokan sudut bisa diabaikan, menyederhanakan perhitungan.



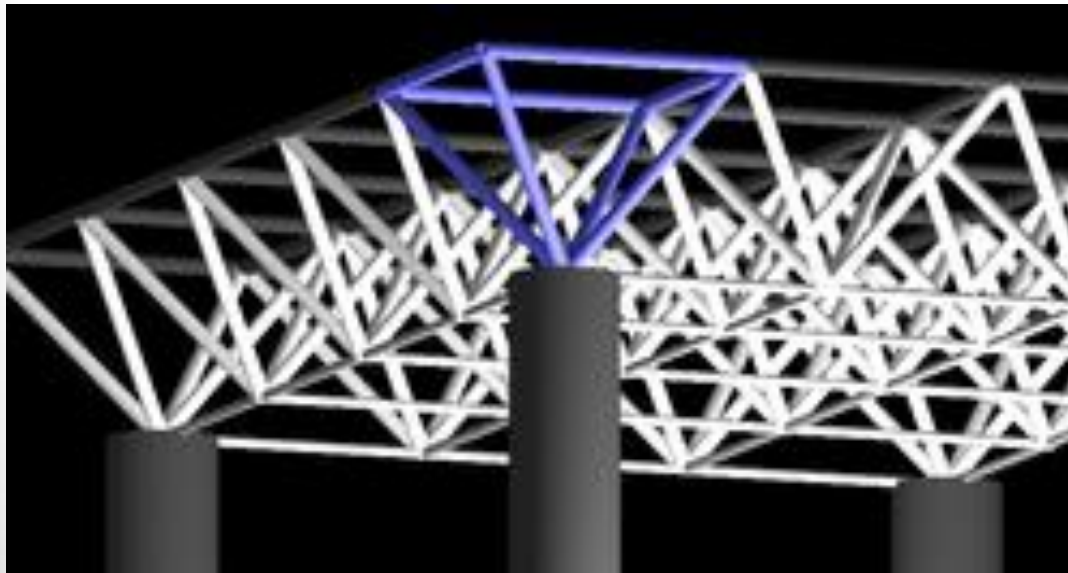
Material *Space Frame*

- Material yang bisa digunakan untuk *Space Frame* adalah kayu & besi.
- **BESI:** material besi yang digunakan pada rangka ruang akan meneruskan lebih banyak beban dan menanggung berat yang cukup besar. Besi ini banyak digunakan pada struktur bentang lebar dewasa ini harus dirawat dengan baik.
- **KAYU:** bahan ini juga digunakan pada abad ke-19 & memerlukan perawatan yang lebih banyak.

Metode Desain *Space Frame*

Batang-batang rangka ruang disatukan dengan penghubung/konektor. Jenis-jenis konektor a.l:

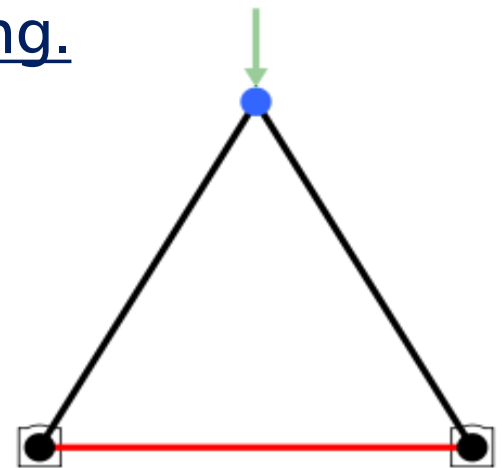
- Konektor Nodus
- Konektor Triodetik
- Konektor *Tuball Node*
- Konektor Kubah *Hemisphere*.



Distribusi Beban *Space Frame*

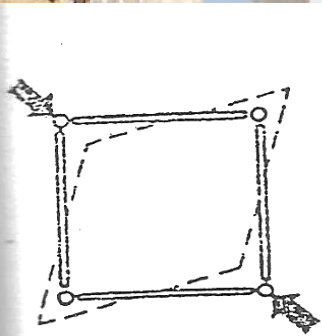
Bentuk rangka ruang paling sederhana adalah lempeng horisontal piramida bujursangkar yang saling mengunci dan tetrahedra yang dibuat dari aluminium atau batang besi bulat.

Rangka ruang dapat digunakan untuk direntangkan pada area yang luas dengan tiang yang sedikit. Seperti truss, rangka ruang itu kuat karena sifat kaku dari segitiga. Beban lentur (momen tekuk) diteruskan sebagai tegangan dan beban tekanan menerus di sepanjang batang.

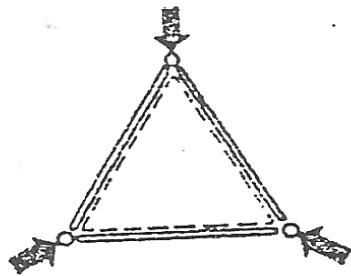


Distribusi Beban *Space Frame*

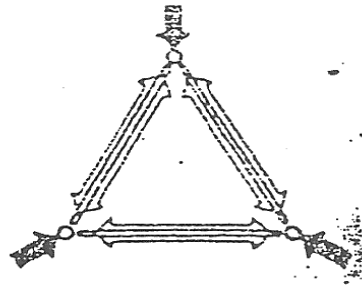
- ✓ Penyusunan elemen-elemen menjadi himpunan segitiga yang membentuk komposisi lengkap dan stabil
- ✓ Sembarang susunan segitiga akan menghasilkan struktur yang stabil dan kaku (*rigid*)



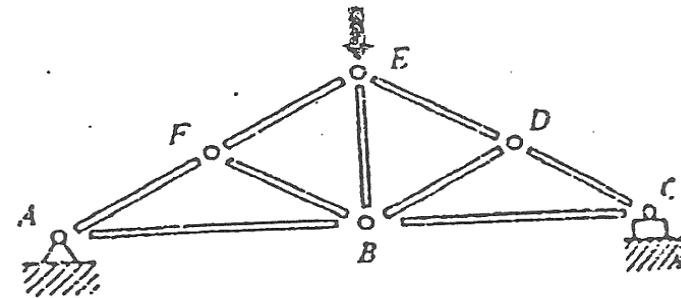
(a) Konfigurasi tidak stabil



(b) Konfigurasi stabil



(c) Gaya batang



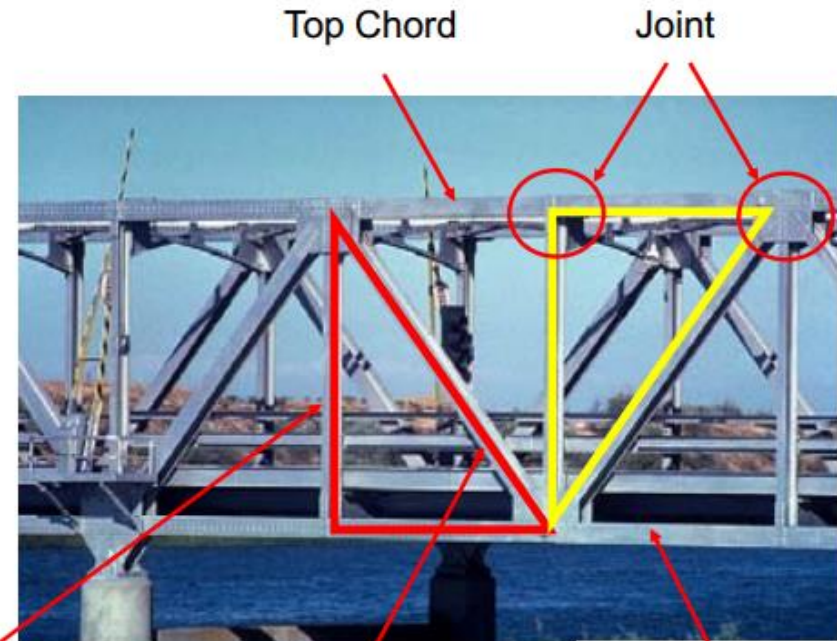
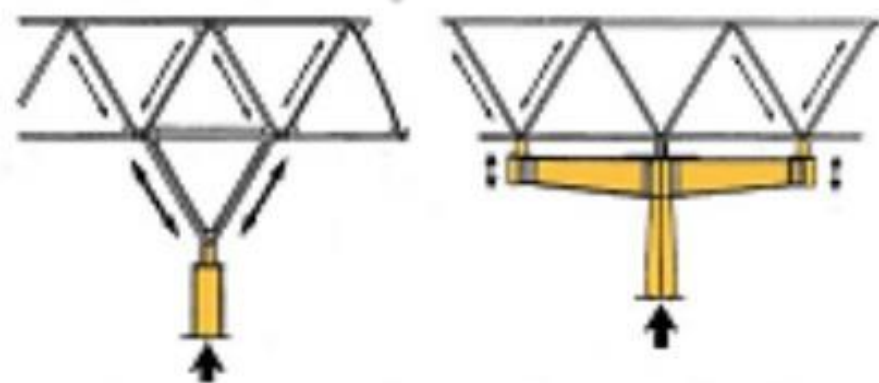
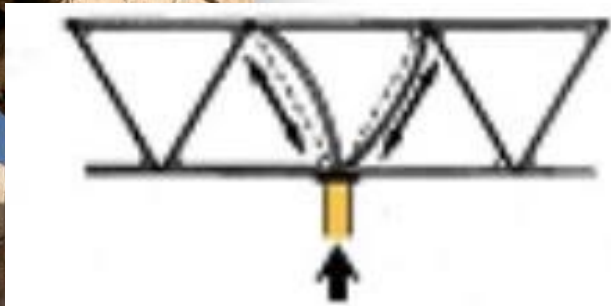
(b) Rangka batang stabil: pola batang yang seluruhnya segitiga.

Distribusi Beban *Space Frame*

- ✓ Struktur rangka batang dari elemen segitiga akan semakin efektif (juga efisien) apabila struktur tersebut dibuat menjadi rangkaian yang meruang (3 dimensi)
- ✓ Penahanan gaya (tarik-tekan) diharapkan tidak melentur
- ✓ Bentuk segitiga dapat menahan gaya-gaya eksternal dari berbagai vektor arah sehingga efisien dalam menahan tegangan tekuk (*buckling*), sangat efisien dan teratur apabila sistem sambungan memiliki kemiringan vektor 45° - 60°
- ✓ Struktur *space-frame* tidak membedakan antara batang utama (mayor) dan batang pendukung (minor)

Distribusi Beban *Space Frame*

Penanganan terhadap tegangan tekuk dapat diterapkan dengan metode-metode yang mudah dan efisien



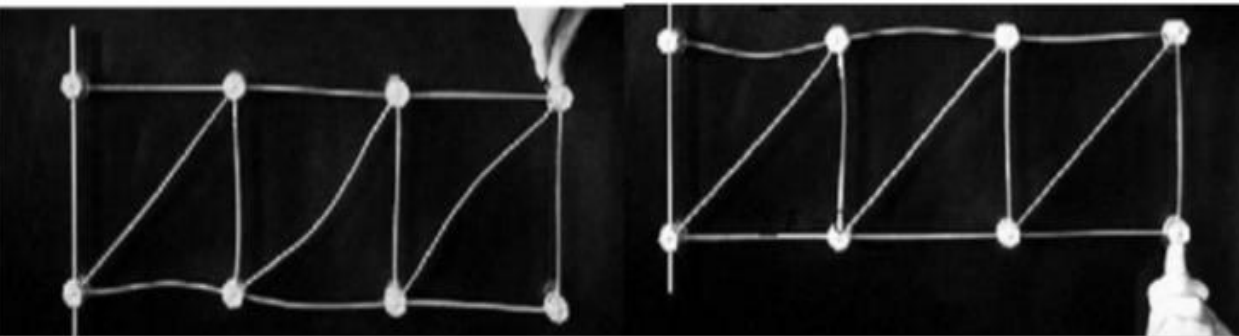
Vertikal Member

Diagonal Member

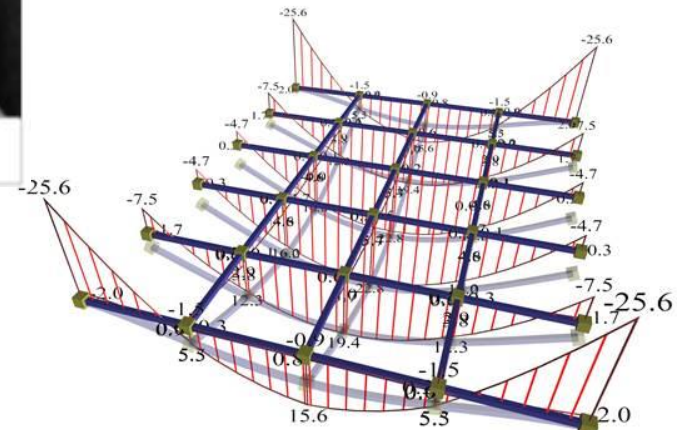
Bottom Chord

Latarbelakang Struktural

Rangka ruang di sepanjang rentangan struktur plat 3 dimensi berdasarkan kekakuan segitiga dan tersusun dari elemen-elemen lurus hanya mengikuti tekanan atau kompresi aksial, bahkan dalam kasus hubungan dengan sambungan yang termasuk kaku, pengaruh momen bengkok atau puntir menjadi tidak penting.

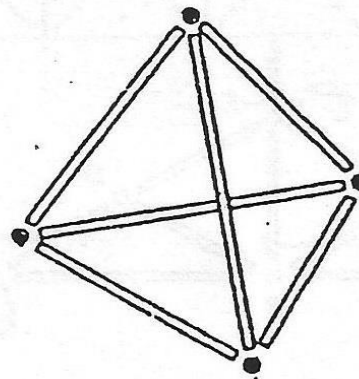
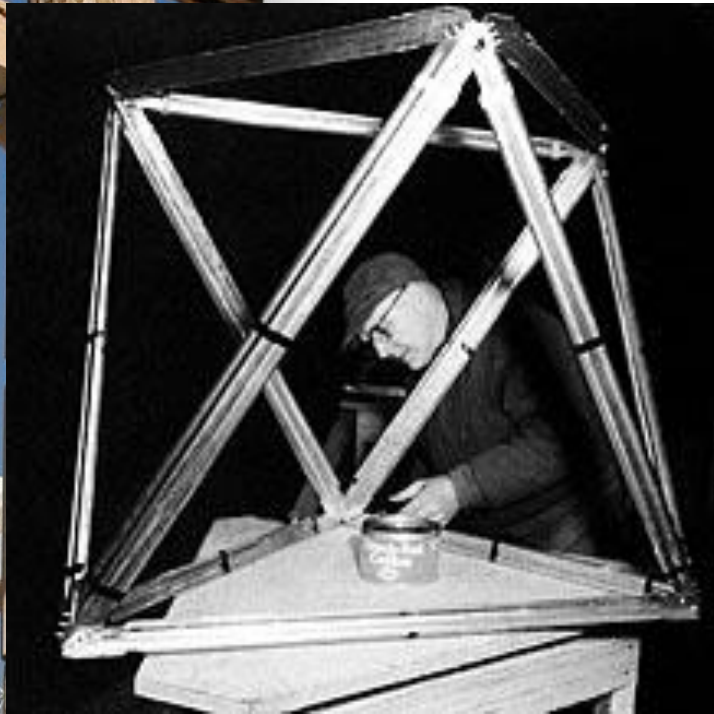


Visualizing compression and tension from deformed shape, loads applied only at joints.

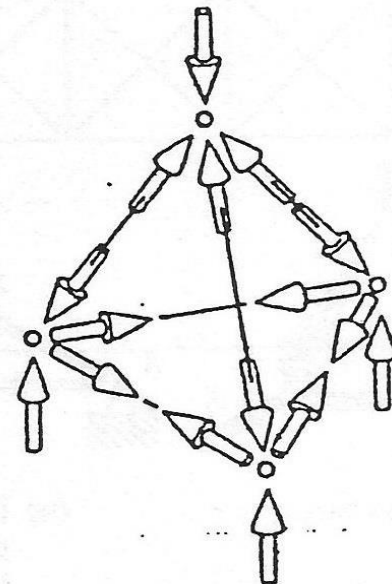


Prinsip Mekanik *Space Frame*

Bentuk dasar rangka ruang adalah tetrahedron yang susunannya dapat berulang apabila bentangan struktur rangka diperlebar



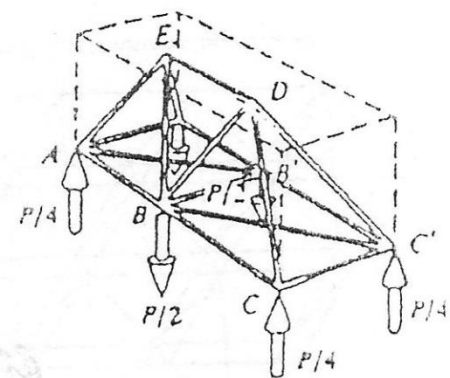
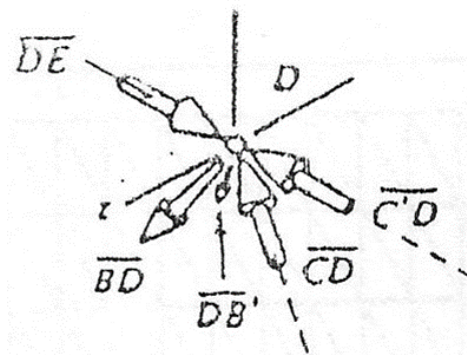
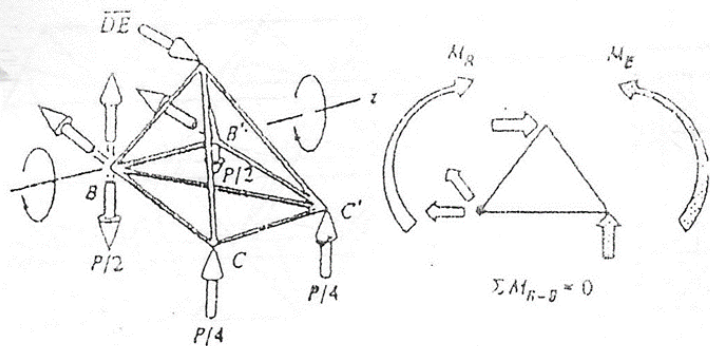
(a) Tetrahedron



(b) Gaya batang

Prinsip Mekanik *Space Frame*

- ✓ Kumpulan segitiga dengan sistem meruang menerima gaya-gaya dari berbagai sumbu koordinat melalui titik-titik kumpul yang terdiri atas gaya batang dan beban eksternal
- ✓ Resultan gaya tiap-tiap sumbu ($\sum F_x$; $\sum F_y$; $\sum F_z$) harus bernilai '0' untuk menjaga keseimbangan rotasional dan translasional
- ✓ Didapatkan kemungkinan lebar bentang 6x s.d. 36x unit modul jika diukur berdasarkan kemiringan 45° - 60° terhadap rusuk bentang



(a) Konfigurasi tiga dimensi khas

Keterbatasan *Space Frame*

- Rangka ruang atau struktur ruang itu seperti *truss*, struktur ringan kaku yang dibuat dari batang-batang yang saling terhubung dalam pola geometris.
- *Space Frame* bisa digunakan untuk struktur *platform* atau atas yang melingkupi jarak yang besar tanpa tiang tumpuan beban.
- *Space frame* sangat menguntungkan dibandingkan struktur lain dalam hal ringan, produksi massal, kekakuan dan serbaguan.
- *Space frame* digolongkan dalam 3 jenis sesuai jumlah lapisan grid: 1, 2 atau 3 lapis.
- Sambungan *space frame* bisa dibuat dengan pengelasan, mur baut atau ulir.
- Konstruksi *space frame* menggunakan 3 metode pendirian: 1) metode *scaffolding*, 2) metode perakitan blok & 3) metode pengangkatan



Jenis-jenis *Space Frame*

- Klasifikasi berdasarkan kelengkungan:
 1. Datar Rata (*Space Plane Cover*)
 2. Silinder Kubah (*Barrel Vault*)
 3. Kubah Bola (*Spherical Domes*)
- Klasifikasi berdasarkan Pengaturan Elemen
 1. Satu lapis (*Single Layer Grid*)
 2. Dua lapis (*Double Layer Grid*)
 3. Tiga lapis (*Triple Layer Grid*)

Berdasarkan Kelengkungan:

1. Space Plane Cover

- Struktur ruang yang tersusun dari substruktur mendatar
- Lengkungan (defleksi) pada bidang datar diteruskan melalui batang horizontal dan gaya potong didukung oleh batang diagonal.



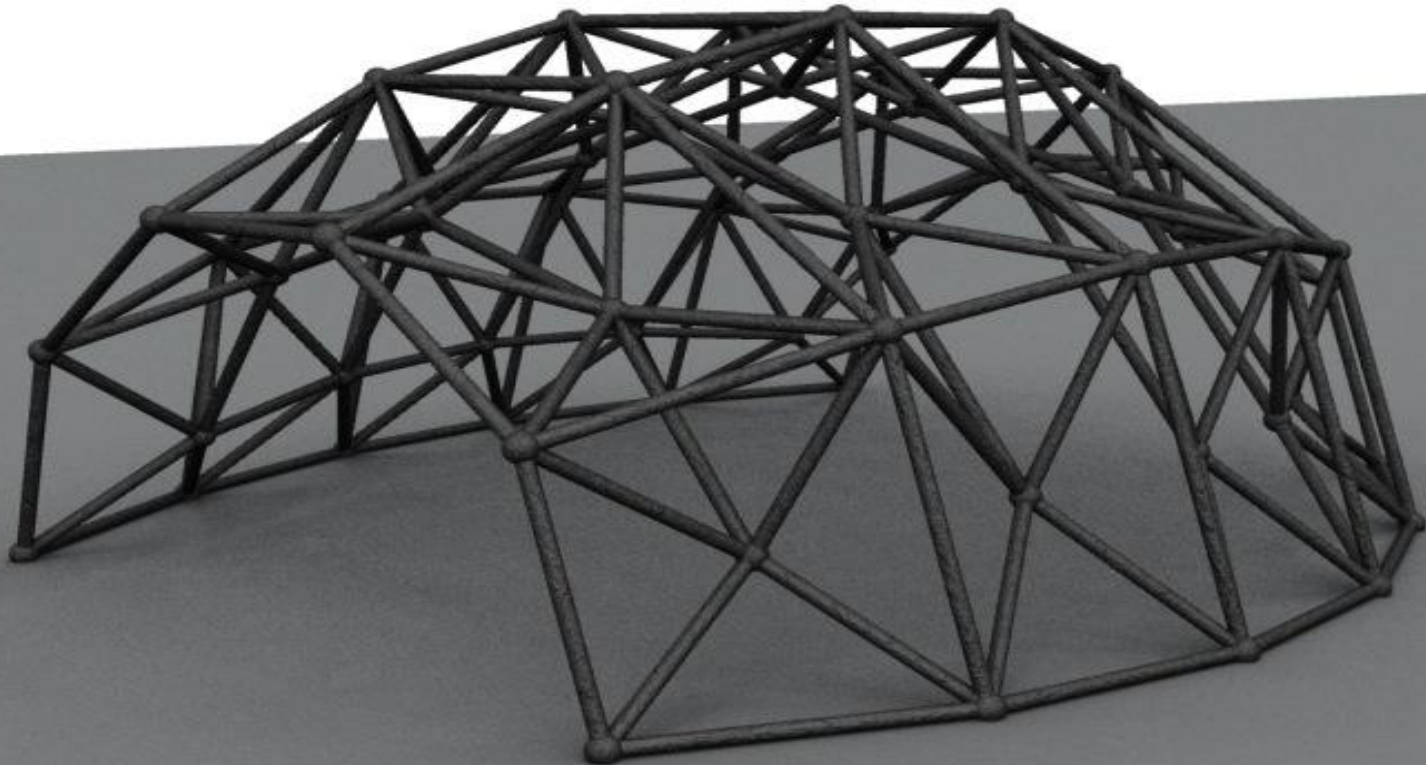
2. Barrel Vault

- Mempunyai potongan melintang dari lengkung sederhana
- Biasanya jenis space frame ini tidak memerlukan modul tetrahedral atau piramida sebagai bagian kekuatannya.



3. Spherical Dome

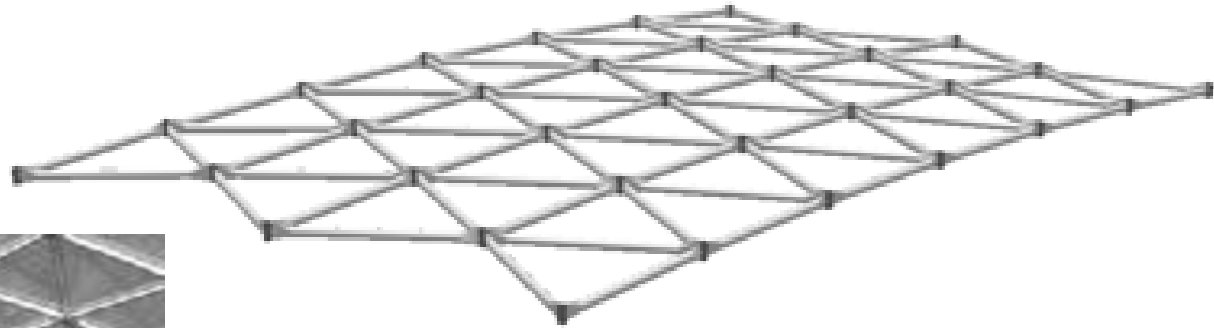
- Harus menggunakan modul tetrahedral atau piramida dan tambahan dukungan dari permukaan.



Berdasarkan Pengaturan Elemen

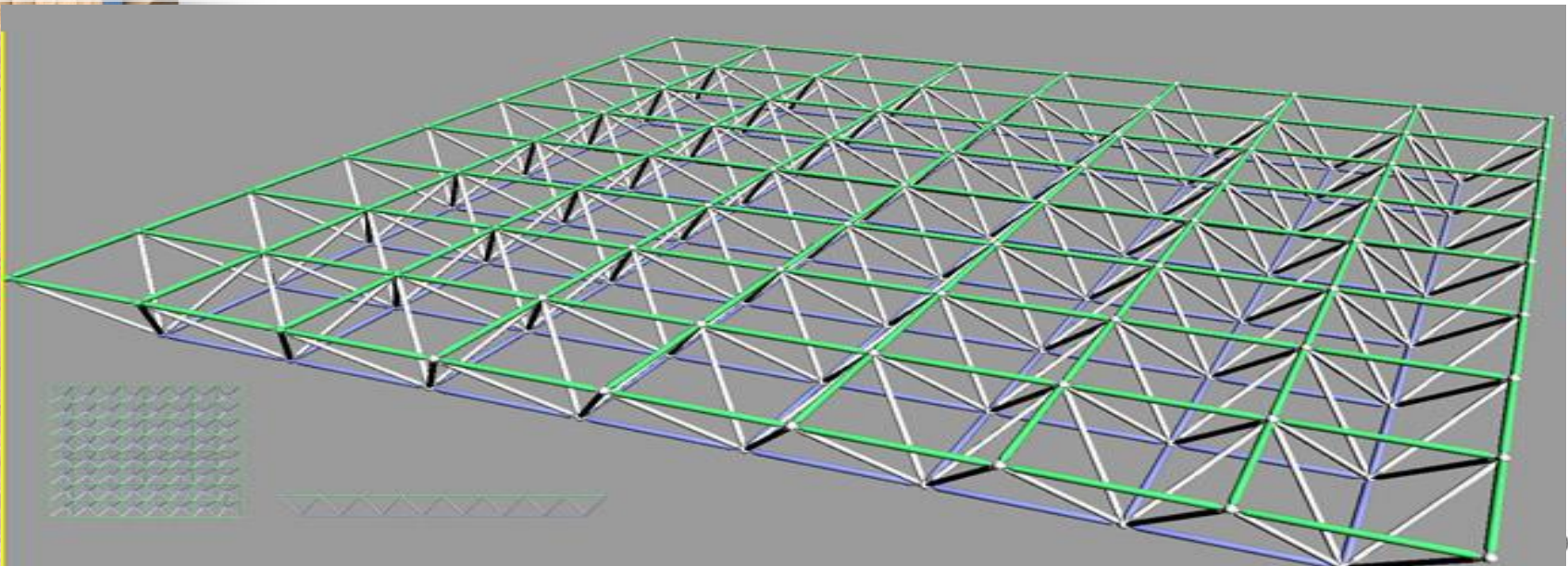
1. Single Layer

- Semua elemen disusun pada satu permukaan.

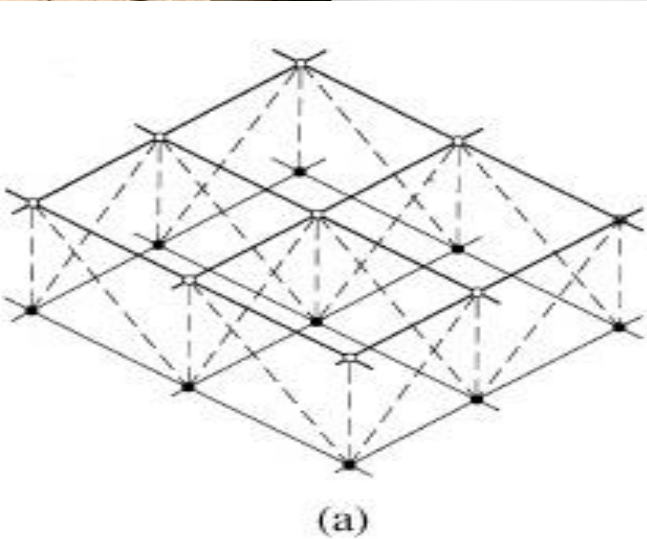


2. Double Layer

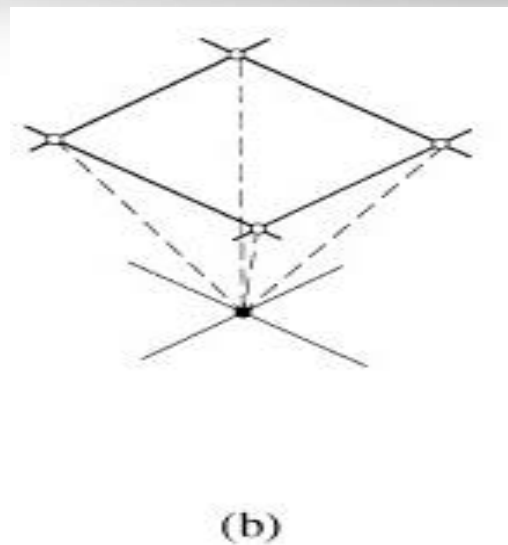
- *Space frame* yang umumnya digunakan berbentuk *double layer* dan rata
- Elemen-elemen diatur dalam layer sejajar yang masing-masing dipisahkan dengan jarak tertentu.
- Masing-masing layer membentuk pola geometris segitiga, bujursangkar atau segienam, dengan proyeksi titik-titik hubung pada tiap layernya saling melingkupi atau menggantikan.



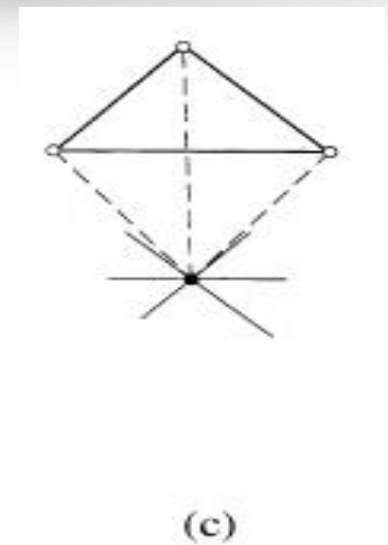
2. Double Layer



Rangka berkisi-kisi planar
(*Planar latticed Truss*)

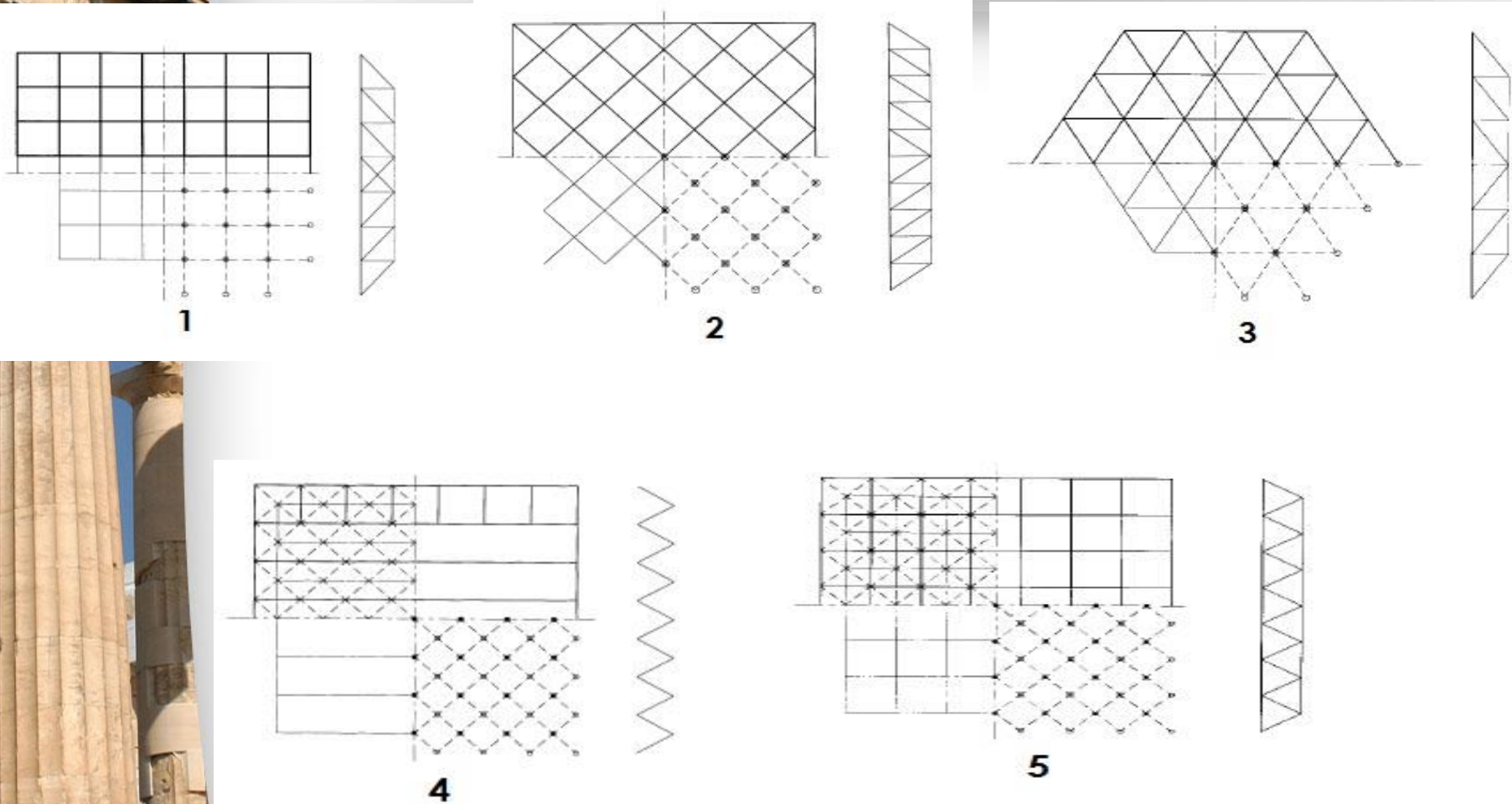


Limas segi empat (separuh
oktahedral)

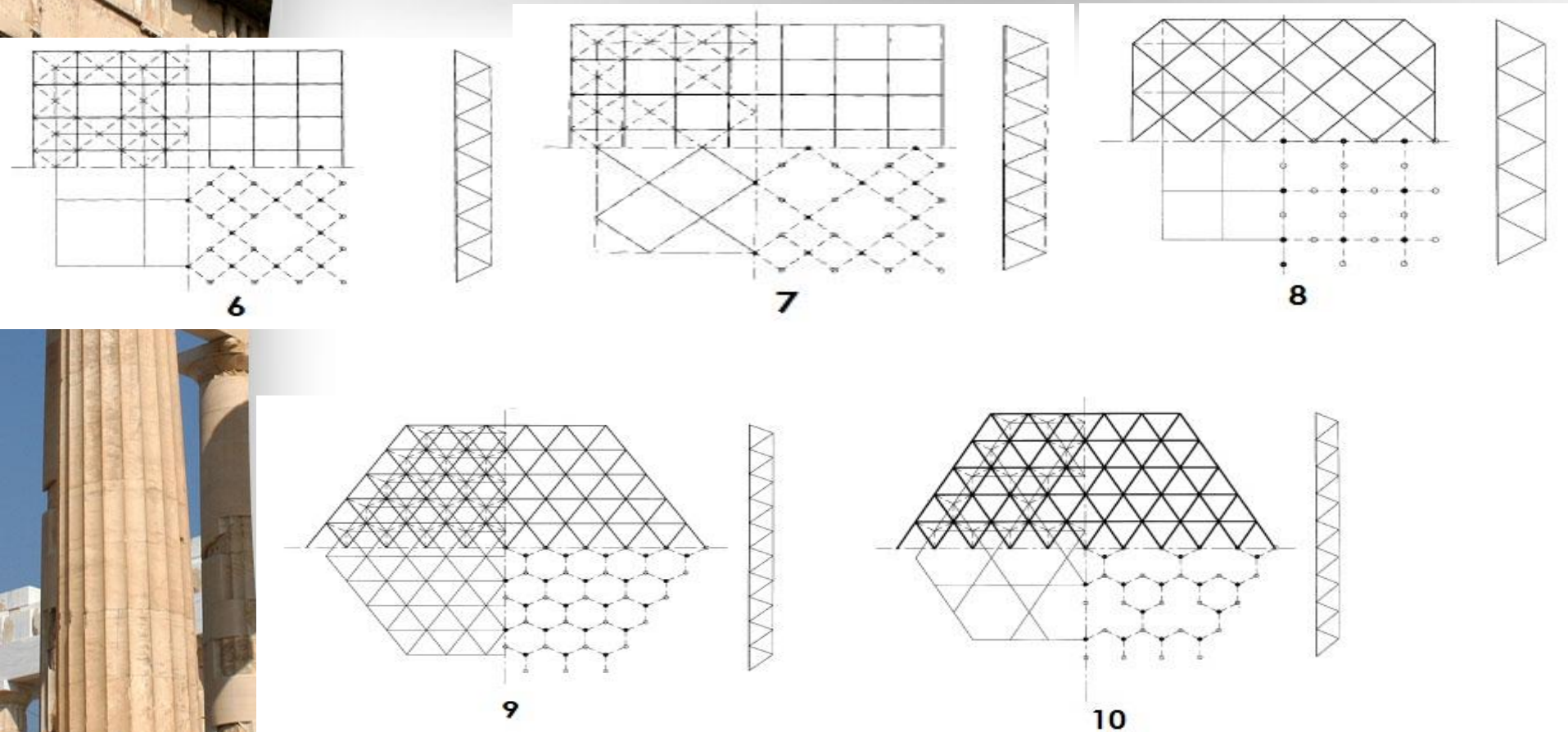


Limas segitiga
(tetrahedral)

Pengembangan Dasar Double Layer Grid



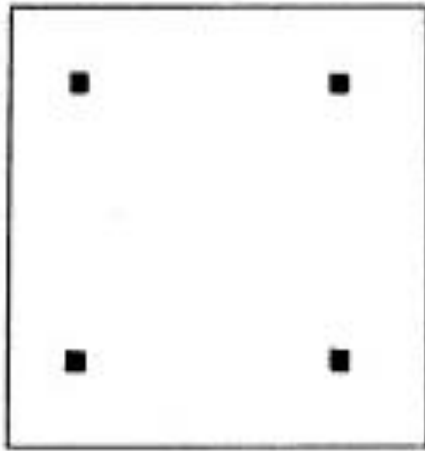
Pengembangan Dasar Double Layer Grid



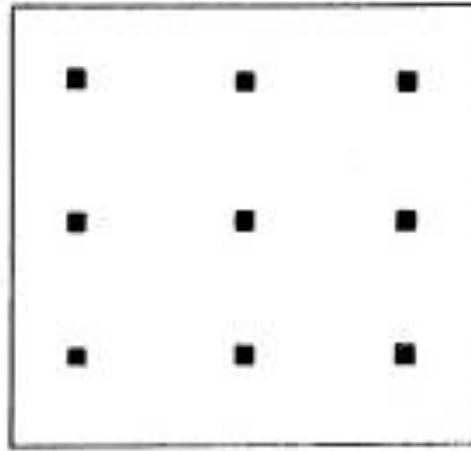
Dukungan Struktural Double Layer Grid

- a) **Dukungan di Sepanjang Tepi (*Perimeter*)**; Metode ini yang paling banyak digunakan di berbagai lokasi. Dukungan terhadap *double layer grids* mungkin secara langsung dialirkan ke kolom atau pada cincin balok yang menghubungkan kolom dengan dinding luar. Harus diperhatikan bahwa ukuran modul dari grid harus dicocokkan dengan pemberian spasi kolom.
- b) Metode ***Multi Column Support***; memberi kolom-kolom pokok sebagai penyangga struktur *Space-Frame* di sepanjang bagian tepi bangunan (*perimeter* bangunan), pada pojok-pojok bangunan, atau berpatokan pada modul-modul tertentu.

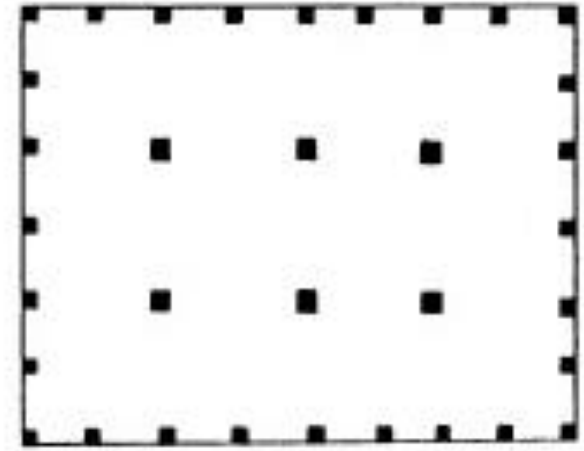
Dukungan Struktural Double Layer Grid



(a)



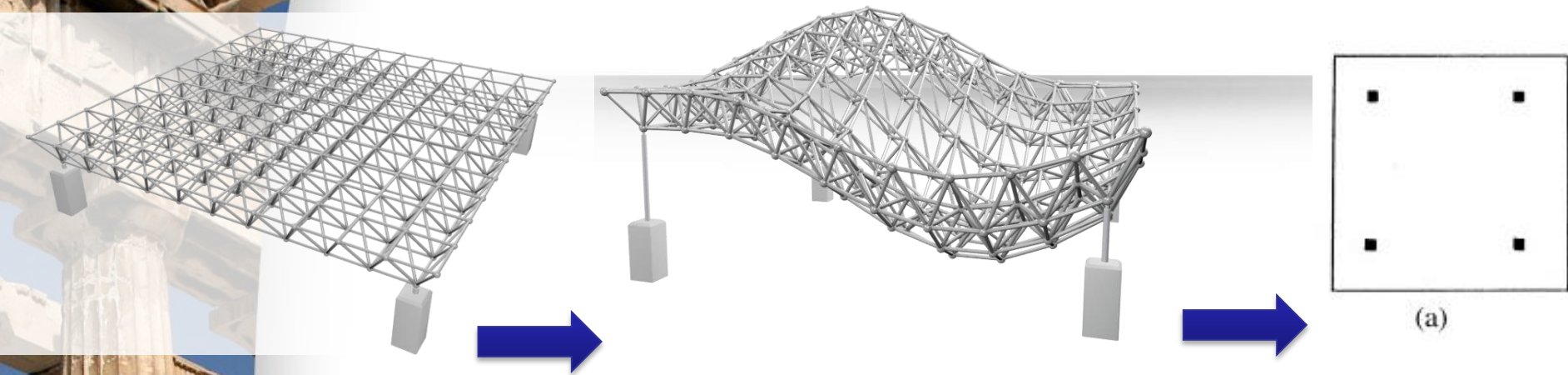
(b)



(c)

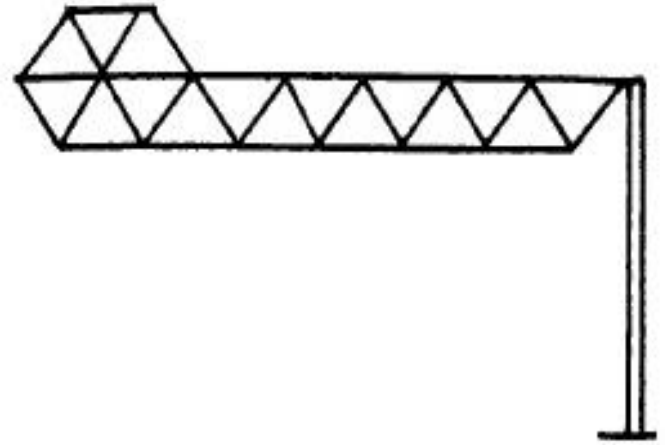
Multi-column supports.

Dukungan Struktural Double Layer Grid

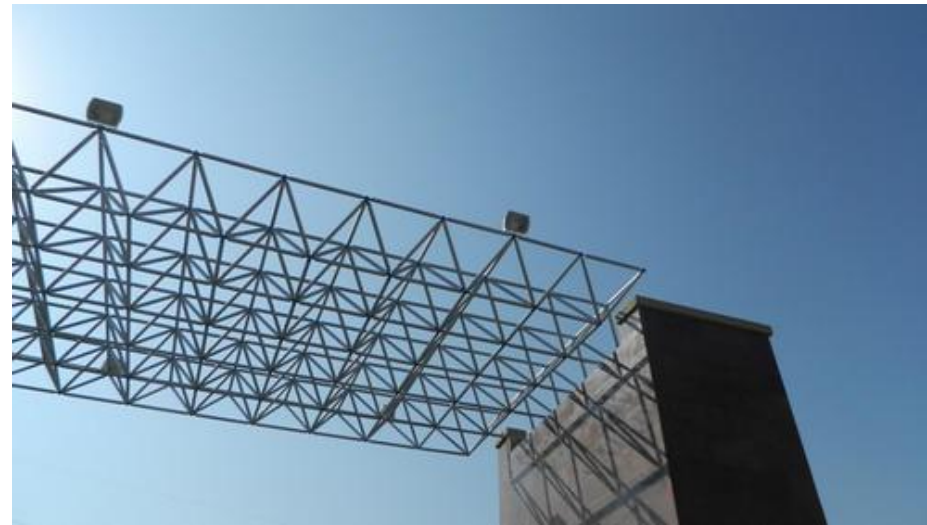


Dukungan Struktural Double Layer Grid

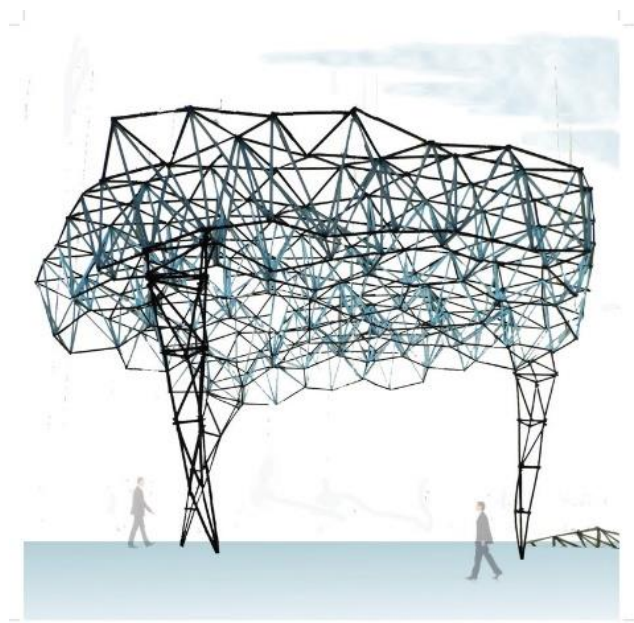
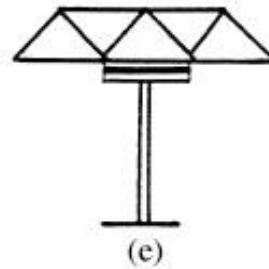
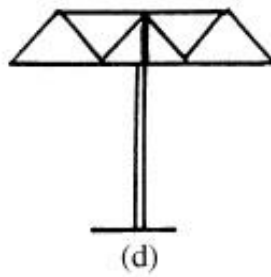
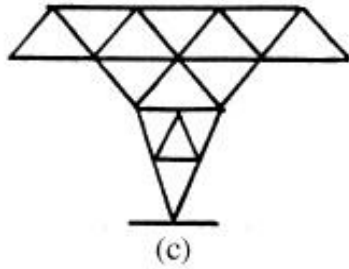
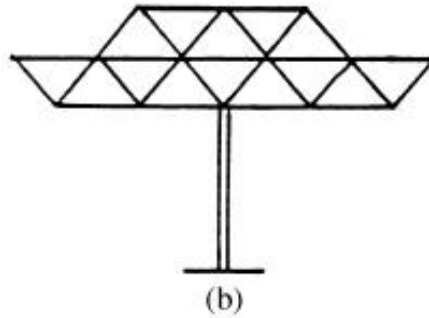
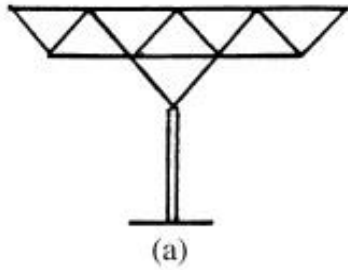
Memadatkan sistem *space-frame* dengan mempertebal komposisi framing lebih kompleks pada bagian yang bebas (kurang mendapat sokongan dari kolom penyangga) atau membuat sistem penyangga memiliki jangkauan sokongan yang lebih luas (dengan membuat sistem framing lebih kompleks pada bagian penyangganya, atau membuat balok penyangga pada puncak kolom yang bersambungan langsung dengan sistem *space-frame*)



Triple layer grids on the free side.



Dukungan Struktural Double Layer Grid



3. Triple Layer

- Elemen-elemen ditempatkan pada 3 layer sejajar yang terhubung diagonalnya.
- Elemen-elemen tersebut hampir selalu rata.
- Dalam prakteknya digunakan untuk bentang bangunan yang sangat lebar.



Material untuk Space Frame

1. Pipa

- 1. Pipa bolong bulat
- 2. pipa bolong kotak



Material untuk Space Frame

2. Konektor

- Konektor bisa dipakai untuk pipa bulat atau kotak, selanjutnya penutup (cladding) bisa dipasang langsung pada penghubungnya.
- Konektor penghubung harus dilas pada ujung batang di lokasi

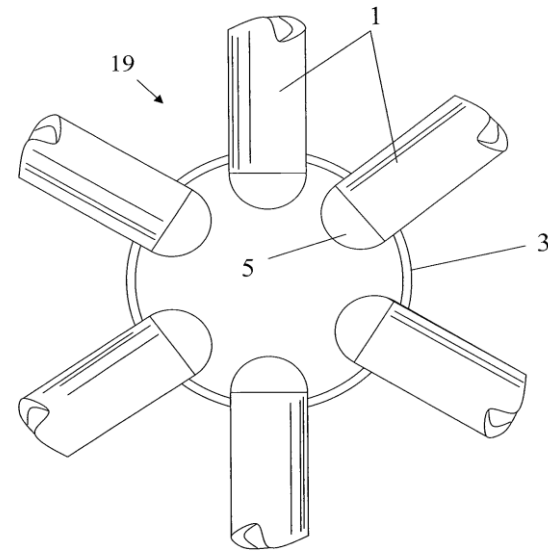
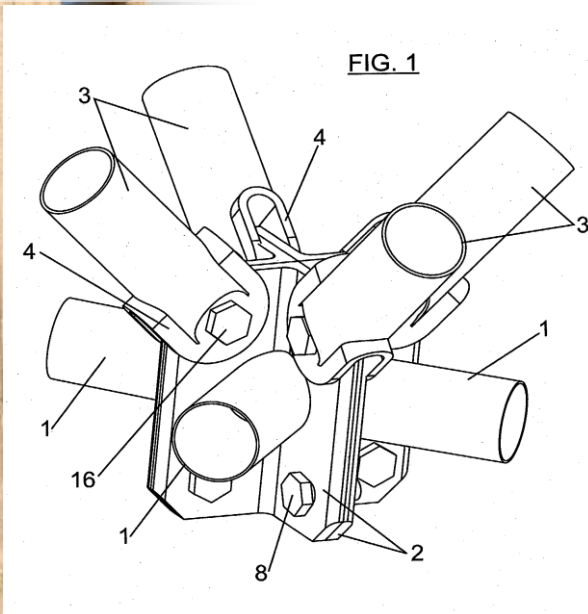
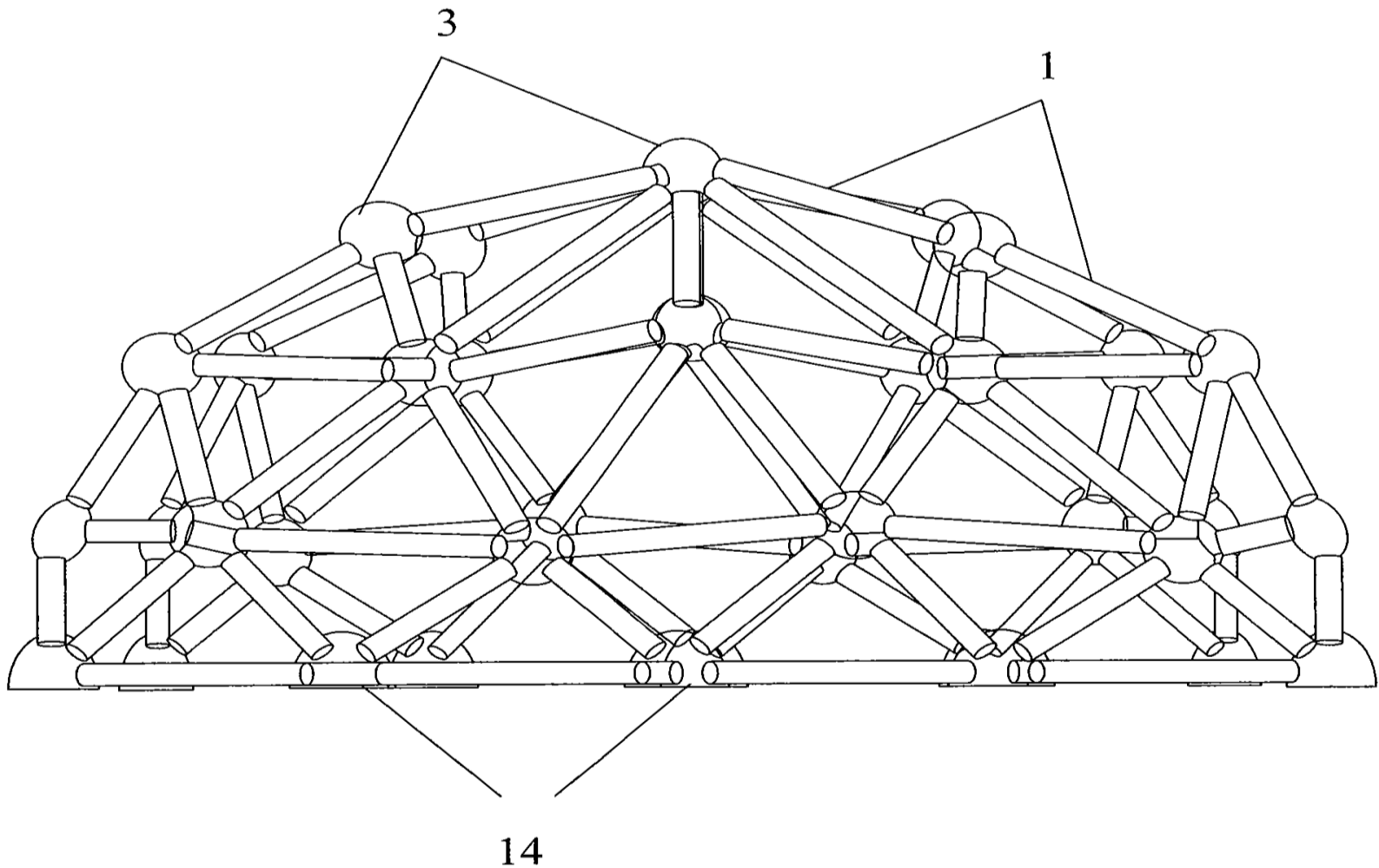


FIG 14

Material untuk Space Frame

2. Konektor

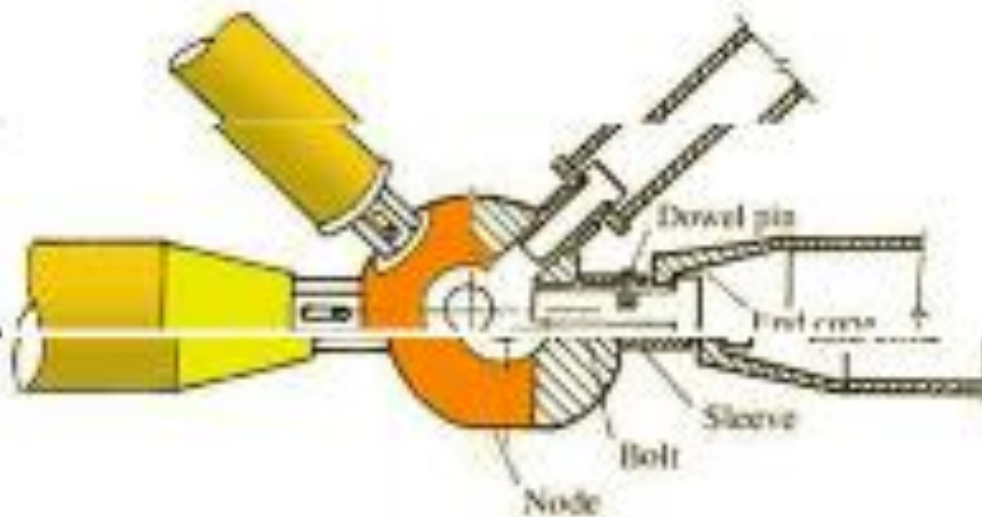
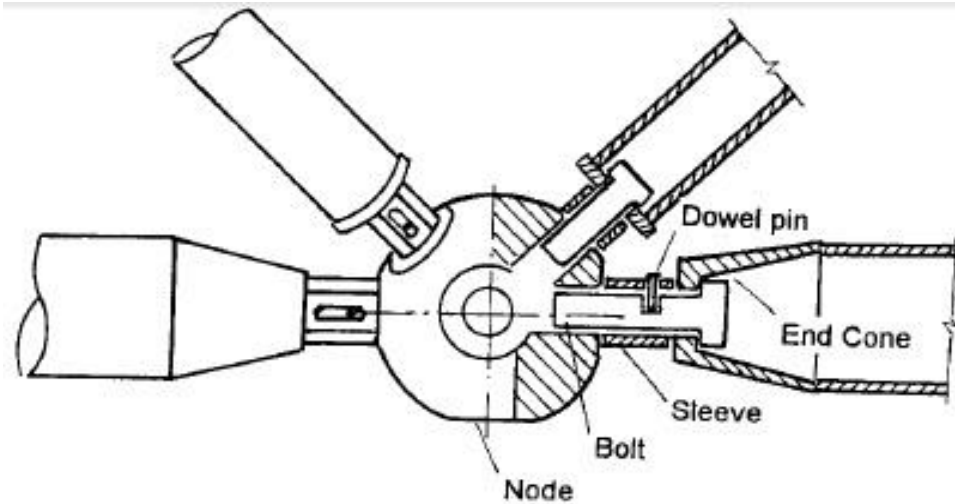


Jenis Konektor

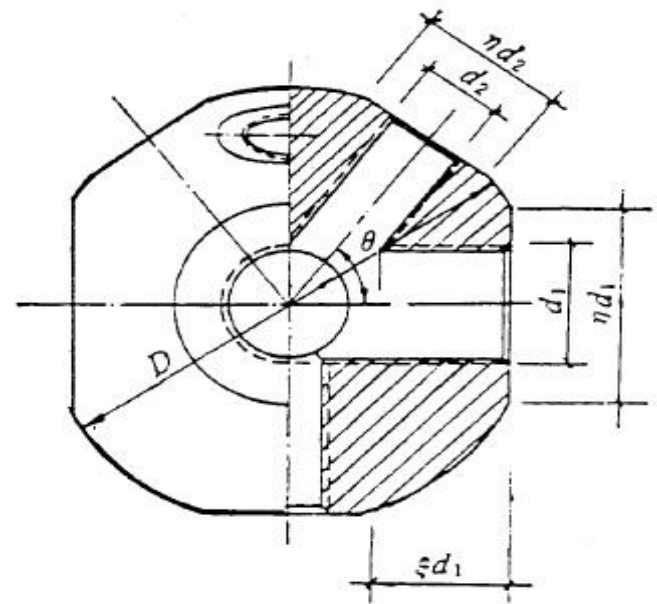
1. SISTEM MERO

- Sistem sambungan ini terdiri dari sebuah benda yang berfungsi sebagai titik sambung dari baja press (*hot pressed steel*) ditempa dengan permukaan-permukaan gosok dan lubang-lubang tepuk. Batang-batang merupakan potongan baja *hollow* dengan baja tempaan berbentuk kerucut yang dilas pada pinggirannya yang dibuat sambungan (*bolt*) pasang yang dapat dilepas. Sambungan (*bolt*) dirapatkan menggunakan pin pengunci (*dowel pin*) yang sudah ditata secara rapi.
- Hingga 18 batang *member* yang dapat disambungkan melalui sistem sambungan ini secara seragam
- Pabrik dapat menghasilkan sambungan ini dengan kisaran diameter dari 46,5 - 350 mm, kemungkinan bentangan berkisar antara M12-M64 dengan batas penanganan gaya maksimum 1413 kN.

1. Sistem Mero



sistem Mero



1. Sistem Mero

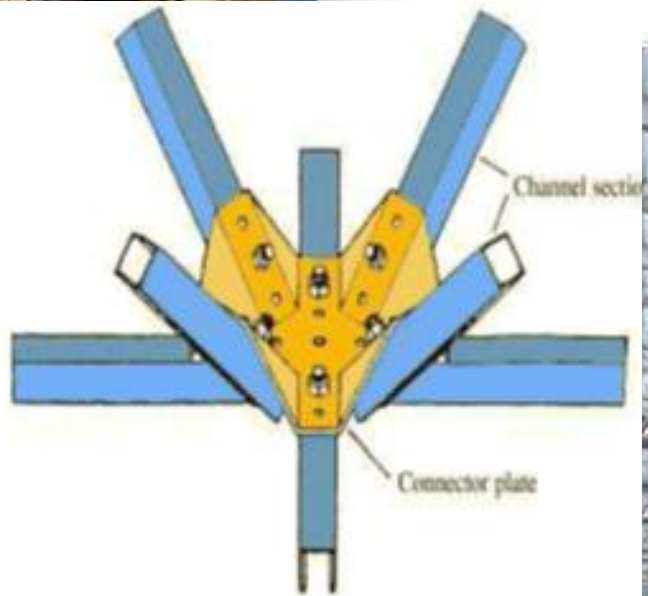


Jenis Konektor

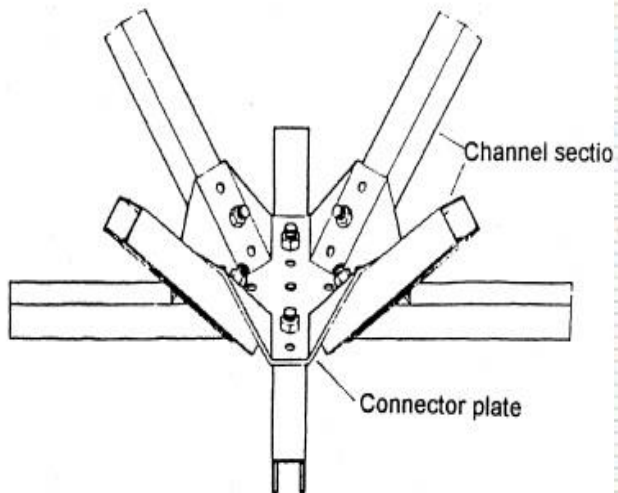
2.SISTEM UNISTRUD

- Sistem sambungan ini terdiri dari plat penghubung yang merupakan plat baja press.
- Hanya terdiri atas 4 (empat) komponen, yaitu plat konektor; *strud*; sambungan (*bolt*); dan *nut*.
- Batang-batang *member* merupakan potongan batang yang dibuat untuk fungsi lubang saluran dan diikat oleh plat konektor dengan menggunakan sambungan tunggal pada masing-masing ujungnya.
- Bentangan maksimal untuk sistem ini sekitar **40 m** dengan standar modul 1,2 - 1,5 m. nama **Moduspan** juga merupakan sebutan untuk sistem ini.

2. Sistem Unistrud



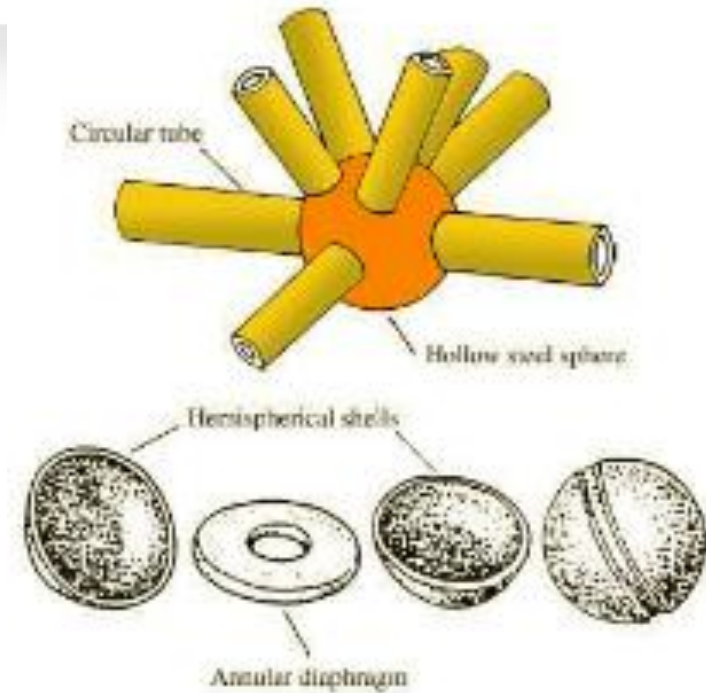
sistem unistruf



Jenis Konektor

3.SISTEM OKTAPLAT

- Memanfaatkan material bola baja *hollow* dan batang silinder yang disambungkan dengan sistem las. Titik sambung terbentuk dari hasil penyambungan las dua cangkang setengah bola secara bersamaan yang terbuat dari plat baja baik melalui sistem *press* panas, maupun dingin.
- Bola baja *hollow* mungkin diperkuat dengan semacam diafragma tahunan.
- Bola *hollow* sudah pernah digunakan dengan diameter hingga 500 mm.

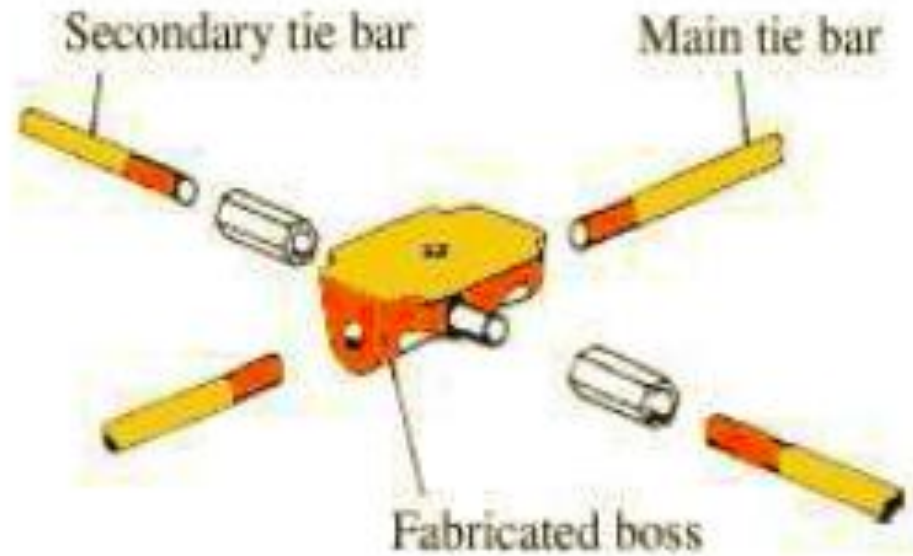
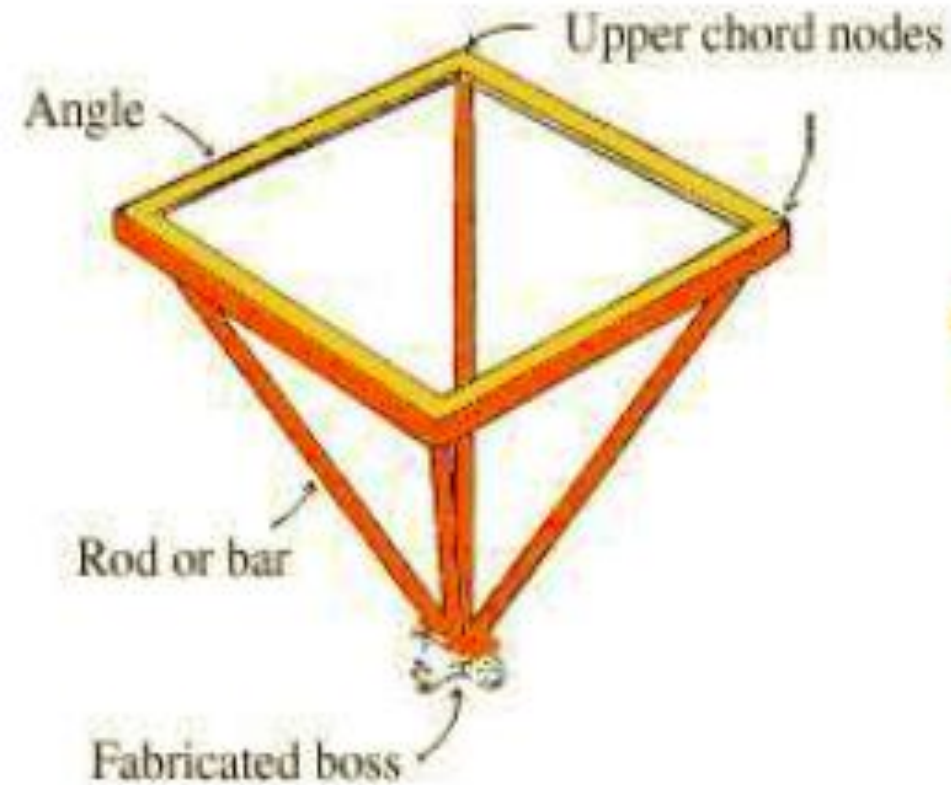


Jenis Konektor

4.SISTEM *SPACEDECK*

- Empat diagonalnya dibuat dari tiang tangkai atau batang yang dihubungkan (dengan sistem las) pada pojok-pojok dari sudut rangkanya dan dihubungkan pada suatu pada bagian yang menempati puncak strukturnya. Hal ini didasarkan pada unit limas segiempat.
- Empat diagonalnya dibuat dari tiang tangkai atau batang yang dihubungkan (dengan sistem las) pada pojok-pojok dari sudut rangkanya dan dihubungkan pada suatu pada bagian yang menempati puncak strukturnya. Hal ini didasarkan pada unit limas segiempat.
- Sistem *space deck* umumnya digunakan untuk bentangan yang lebih kurang dari **40 m** dengan suatu standar modul dan kedalaman 1,2 m. sebuah kedalaman struktural minimum pada 0.75 m juga diterapkan.
- Untuk pembebanan desain yang lebih tinggi dan bentangan yang lebih besar, modul alternatif produksi berkisar antara 1,5 m dan 2,0 m dengan kedalaman yang sama dengan modul.

4. Sistem *Spacedeck*



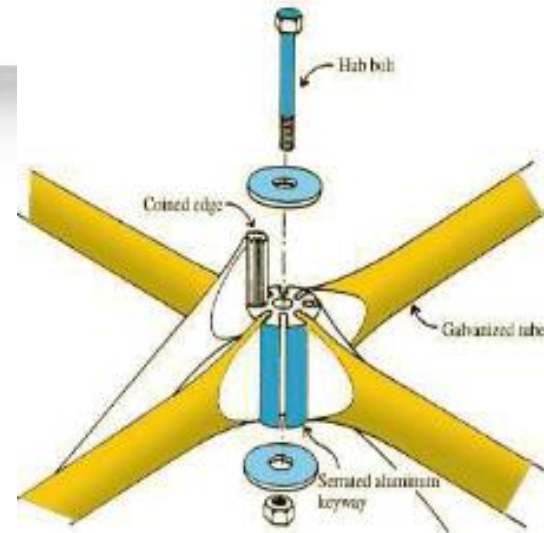
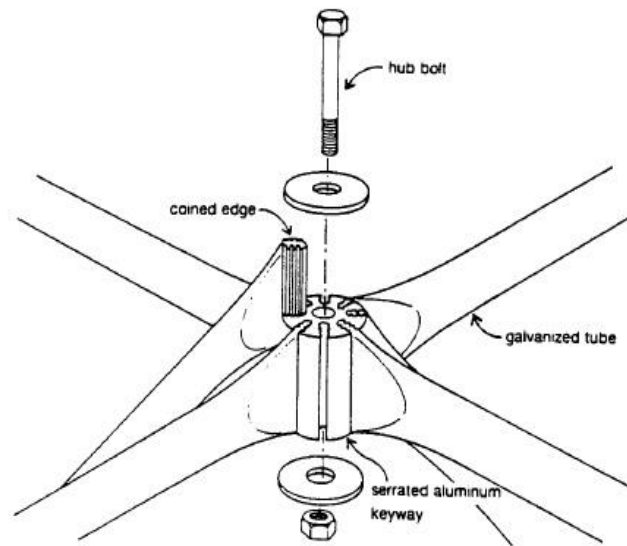
sistem space deek

Jenis Konektor

5.SISTEM *TRIODETIC*

- Terdiri dari sebuah pusat konektor aluminium yang dibentangkan dengan kunci penyambung (*hub*) yang tajam. Tiap-tiap ujung batang di-*press* dengan tujuan untuk membentuk suatu pinggirannya berbentuk koin yang cocok untuk dihubungkan dengan kunci penyambung.
- Sambungan ini selesai ketika seluruh batang sudah dimasukkan pada pusat konektor (*hub*), *washer* diletakkan pada tiap-tiap ujung dari pusat konektor (*hub*), dan sebuah baut ditancapkan pada pusat konektor (*hub*).
- Murni menggunakan material aluminium dan diluruskan menggunakan tabung baja yang digalvanisasikan dan penghubung aluminium (*aluminium hub*).
- Sistem *double layer grids* yang menggunakan sambungan triodetik sudah pernah digunakan pada bangunan dengan bentangan hingga 33 m. Modul dasarnya hampir dapat diterapkan hingga 2,7 m. Kedalaman permukaan umumnya 70% dari ukuran modul.

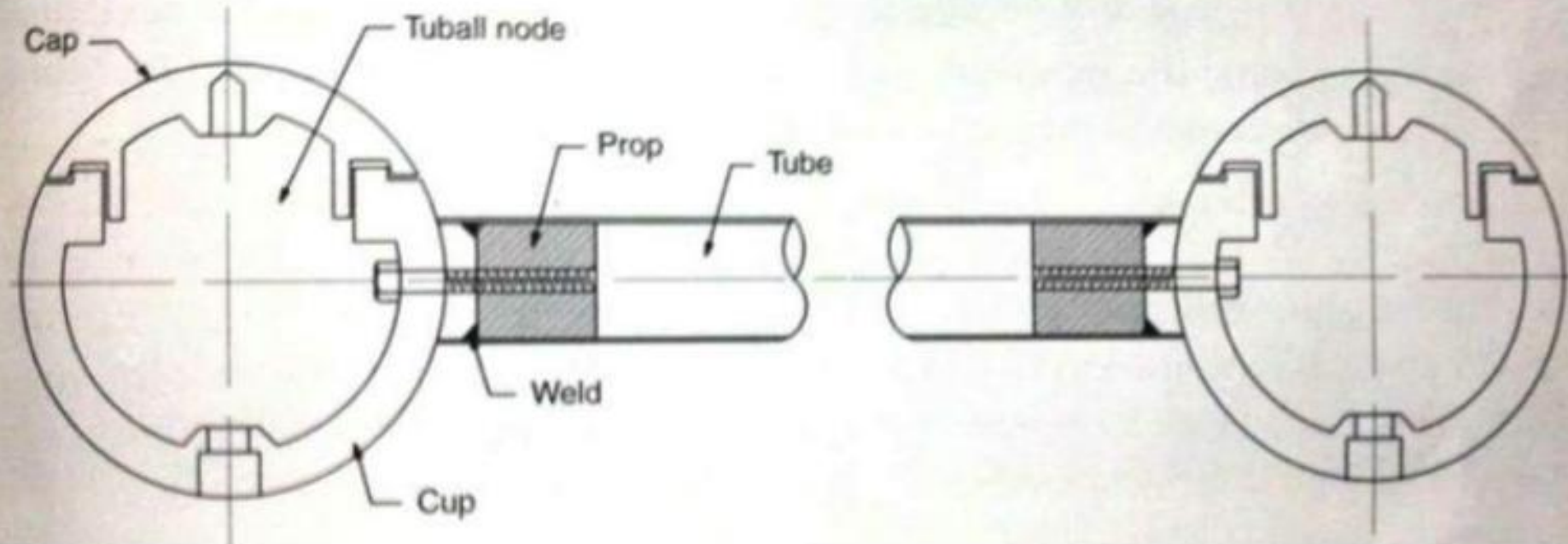
5. Sistem *Triodetic*



Jenis Konektor

6. SISTEM *TUBALL NUT*

- Bola kopong dari bola grafit
- Ujung bagian batang kopong melingkar yang saling terhubung harus disatukan ujungnya dengan las.
- Hubungan di dalam bola menggunakan mur & baut.



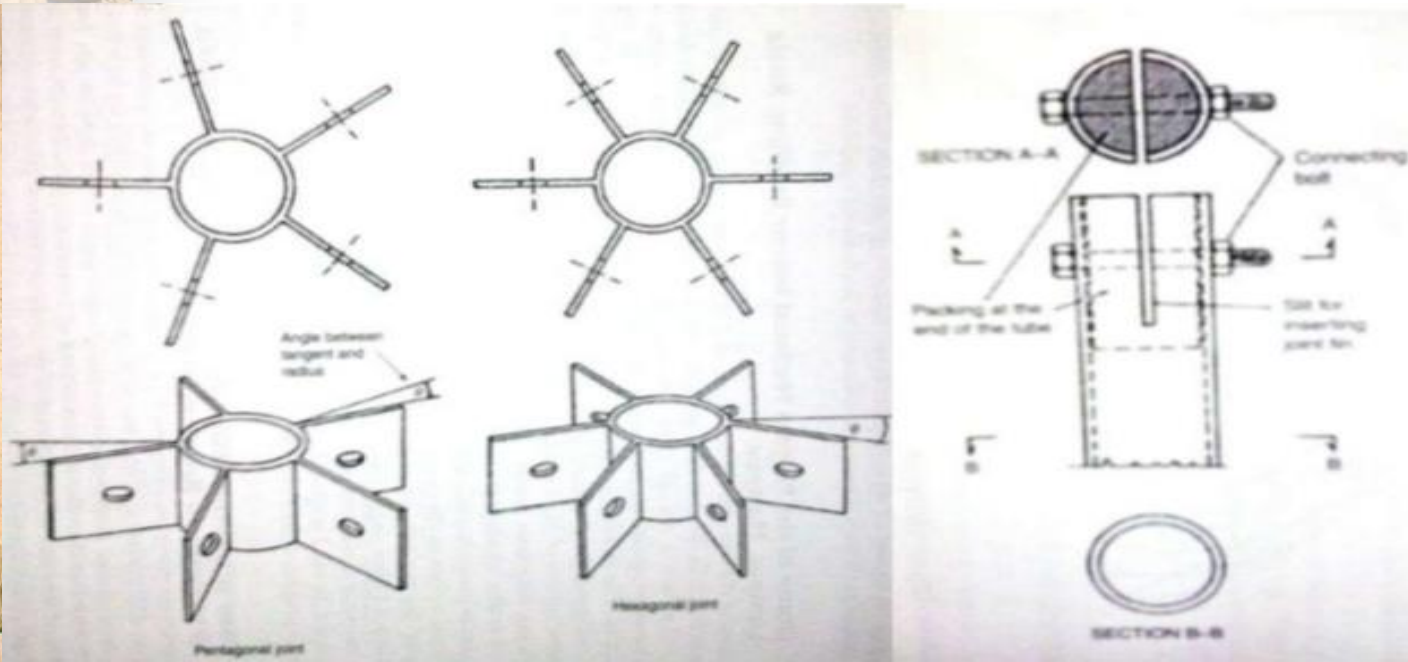
6. Tuball Nut



Jenis Konektor

6. SISTEM *BOLA HEMISPHERE*

- Biasanya digunakan untuk kubah 2 layer.
- Bisa membentang sampai 40m
- Lebih ekonomis untuk bentang yang lebar
- Pertemuan batang dibuat dengan cara membuat celah pada ujung batang atau tabung dengan lidah sambungan.
- Ada 2 jenis konektor: pentagonal & heksagonal.



Kelebihan *Space Frame*

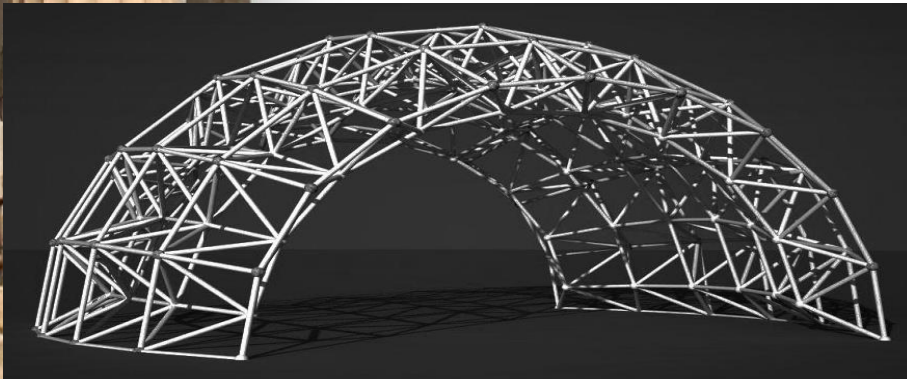
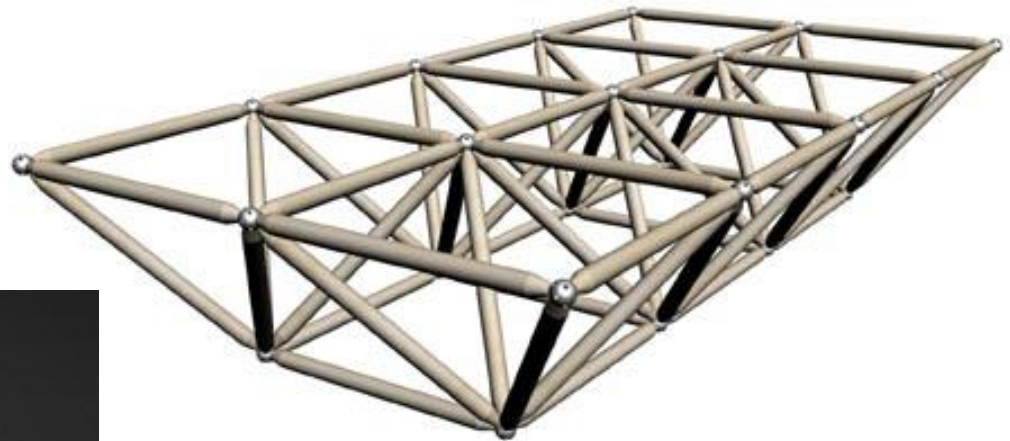
1. Ringan
2. Elegan dan ekonomis
3. Menahan beban secara 3 dimensi
4. Sifatnya sangat kaku
5. Mudah dikerjakan
6. Menghemat waktu & biaya konstruksi
7. Jaringan utilitas (seperti lampu & AC) bisa diintegrasikan dengan space frame.
8. Memberikan kebebasan bagi arsitek untuk menempatkan kolom dan membagi area yang teratapi.
9. Material yang tahan lama dan terlindung finishingnya.
10. Konstruksinya sederhana, aman dan cepat.
11. Tidak perlu mengecat & mengelas di lokasi.



Kelemahan *Space Frame*

Salah satu kelemahannya adalah bisa menyulitkan bagi ahli struktur.

Tidak bisa secara langsung menentukan gaya mana yang akan disebar ke seluruh struktur yang mempunyai banyak batang yang berlebihan.



The background of the slide features a photograph of a classical building, likely a temple or museum, with prominent stone columns and a pediment. The image is partially obscured by a white curved shape on the right side, which serves as a backdrop for the title and text.

Komponen *Space Frame*

BATANG

Batang adalah elemen dengan penampang bulat atau kotak. Semua batang bisa menahan gaya tegang atau tekan. Salah satu kelemahannya adalah bisa menyulitkan bagi ahli struktur.

Grid ruang dibuat dari batang bertegangan panjang dan batang bertegangan pendek. Kecenderungan yang terlihat adalah batang struktural dibiarkan terbuka sebagai bagian dari ekspresi arsitektural.

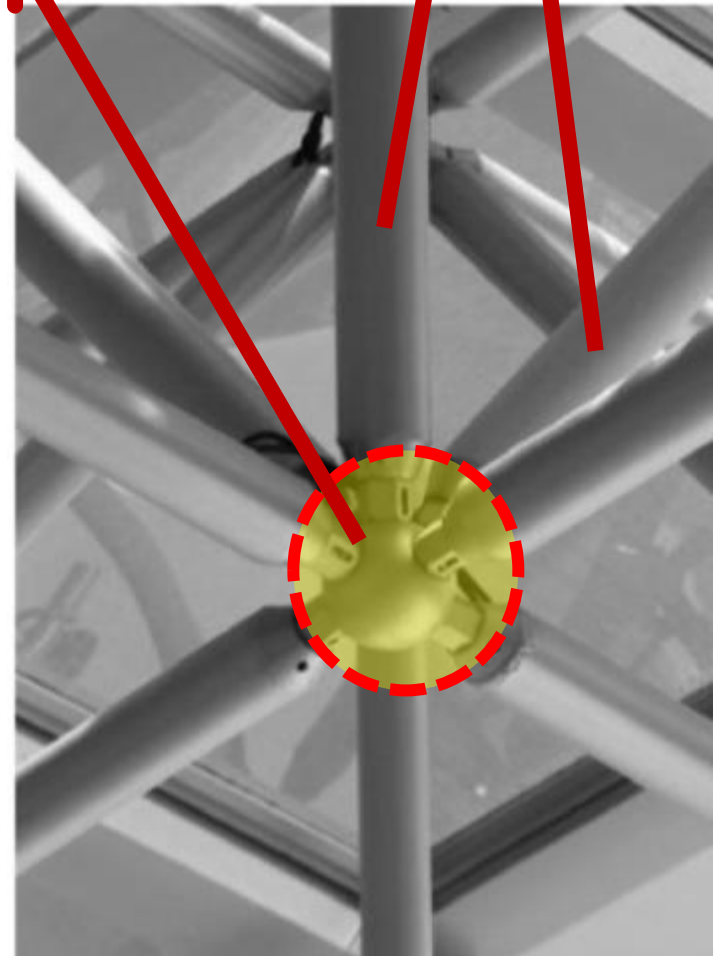
Komponen *Space Frame*

SAMBUNGAN

- Dalam *space frame*, sambungan memainkan peran penting baik fungsional maupun estetis,
- Karena sambungan berperan dalam kekuatan & kekakuan struktur serta menyumbang 20-30% dari berat total, rancangan sambungan sangat penting dari segi ekonomis & keamanan *space frame*.

Sambungan
(joint)

batang



Metode Pengangkatan *Space Frame*

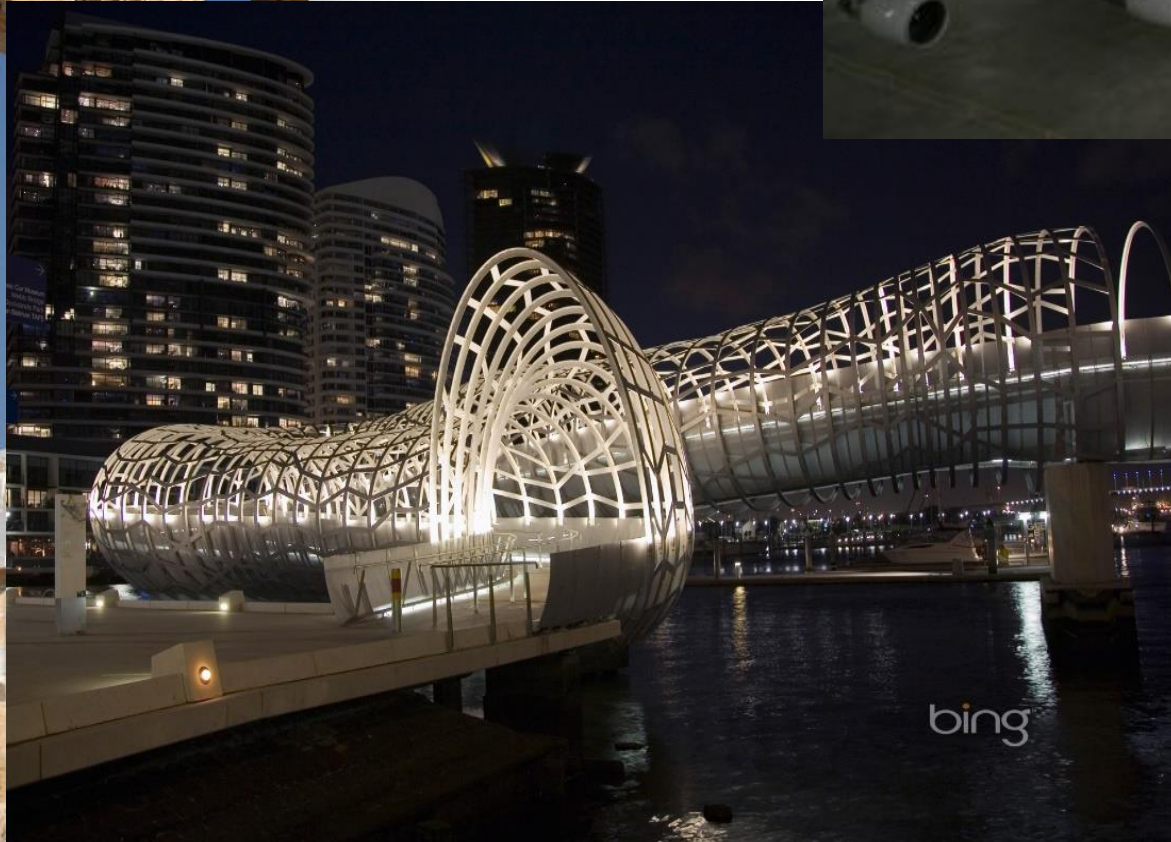
Pemilihan metode pengangkatan tergantung pada:

- Penerusan beban
- Detail konstruksi, agar memenuhi semua tuntutan kualitas, keamanan, kecepatan konstruksi & ekonomi.
- Skala struktur yang dibuat, metode penyambungan batang-batangnya serta kekakuan space frame.



Contoh Penggunaan Space Frame







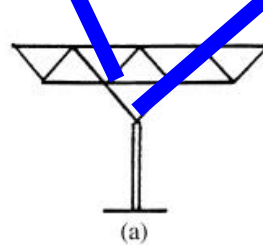
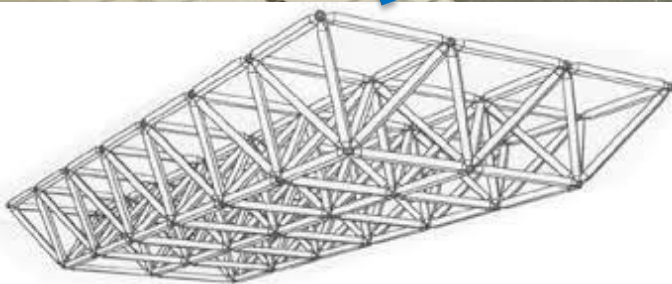
HALL OF NATION PRAGATI MAIDAN



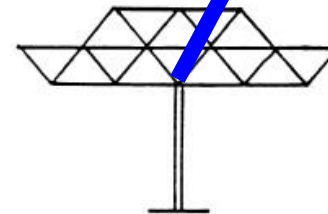


PRAGATI MAIDAN HALL NO-18

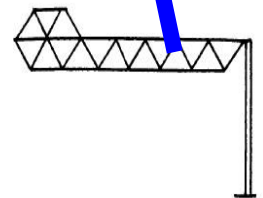
Studi Kasus: GOR Tri Lomba Juang



(a)

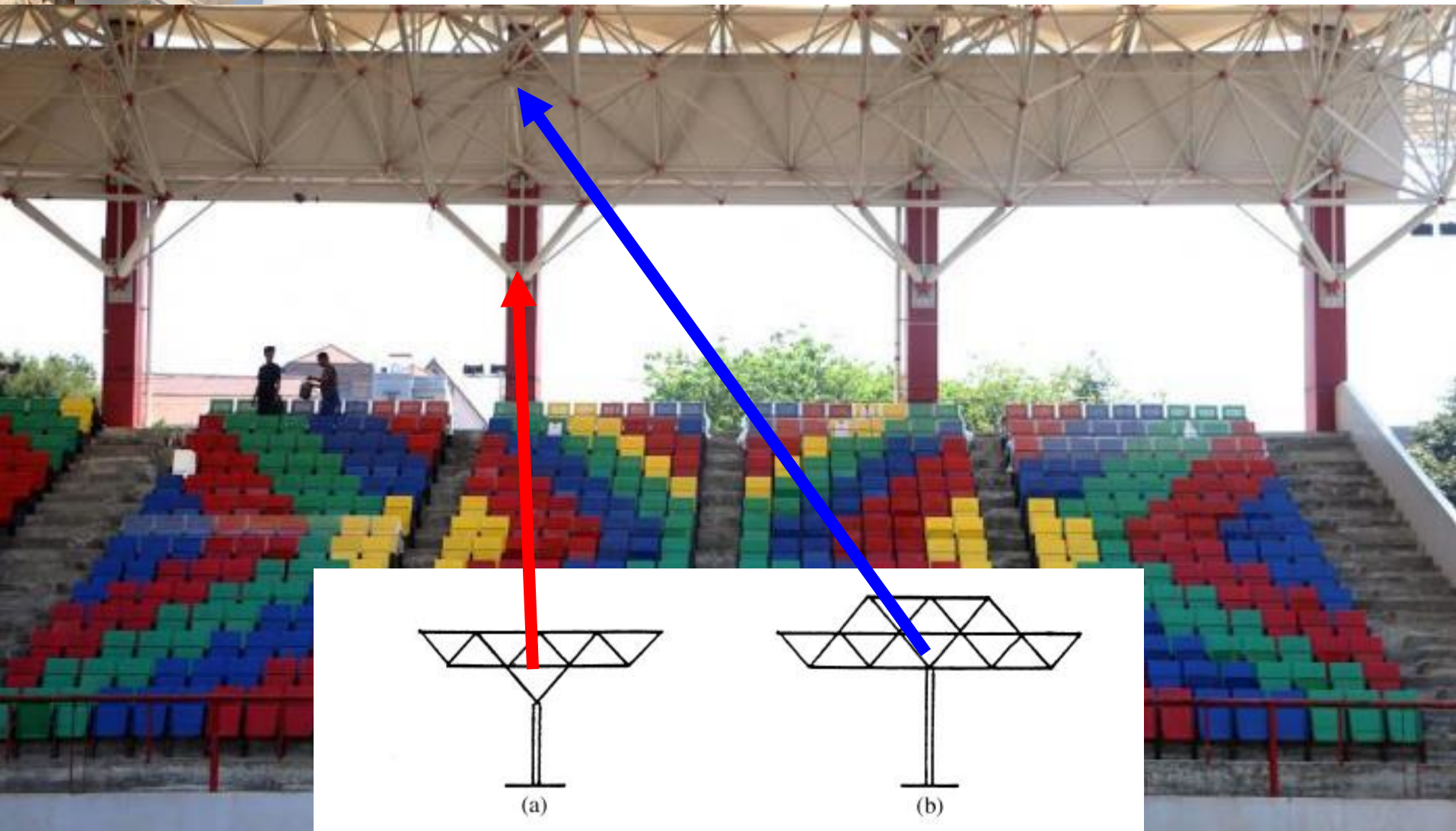


(b)

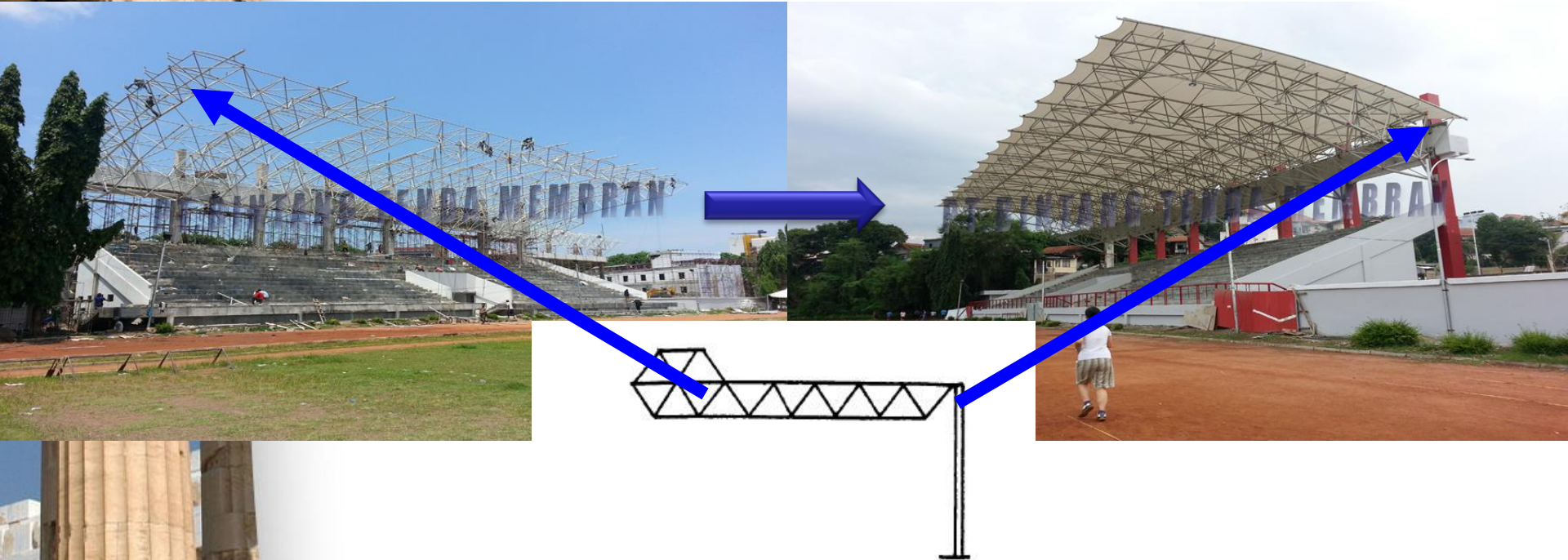


Triple layer grids on the free side.

Studi Kasus: GOR Tri Lomba Juang



Studi Kasus: GOR Tri Lomba Juang Rangka Atap



Triple layer grids on the free side.



Terima kasih....