

Struktur Kabel pada National Athletics Stadium Bruce, Australia

Hendro Trilistyo*)

Abstraksi

Dewasa ini banyak kita jumpai bangunan-bangunan dengan bentang yang sangat lebar. Untuk itu diperlukan sistem struktur yang tidak hanya mampu memikul beban bangunan tetapi juga bisa menambah nilai estetis bangunan tersebut. Yang tampak mencolok adalah struktur pada atap bangunan. Karena atap bangunan yang tinggi akan tampak walaupun dari jarak yang sangat jauh. Untuk mendesain atap yang indah dengan bentang bangunan lebar diperlukan struktur khusus yang dikenal dengan Advanced Struktur. Salah satunya adalah struktur kabel. Struktur kabel sudah lama dikenal oleh manusia. Hal ini dapat kita lihat dengan adanya jembatan gantung yang digunakan oleh manusia pada jaman dahulu. Bahan yang digunakan adalah bahan-bahan dari alam seperti rotan, akar pohon dan bambu. Sekarang ini penggunaan atap kabel banyak dipakai pada stadion-stadion olahraga yang mempunyai bentang yang sangat lebar. Kabel-kabel yang digunakan biasanya terbuat dari bahan baja. Penggunaan atap kabel pada stadion sangat efektif. Selain bisa menambah nilai estetis bangunan, struktur kabel tidak memerlukan kolom-kolom besar untuk memikul beban. Sehingga pandangan penonton tidak akan terganggu oleh kolom-kolom. Hal inilah yang menjadi salah satu keistimewaan struktur kabel dibandingkan dengan struktur yang lain.

Kata Kunci : Struktur Kabel, Stadium, Bentang Lebar

Pendahuluan

Struktur kabel merupakan salah satu struktur funicular, yaitu struktur yang hanya mendapatkan gaya tarik atau gaya tekan saja. Pada kasus struktur kabel hanya gaya tarik saja yang bekerja. Struktur kabel telah digunakan sejak abad pertama SM di China pada jembatan yang menggunakan rantai, kemudian sekitar tahun 70 SM struktur kabel digunakan sebagai atap amphitheatre Romawi. Kemudian di Eropa pada tahun 1218 struktur rantai tergantung pernah dibangun di Alpen, Swiss.

Meskipun demikian teori mengenai struktur ini pertama kali dikembangkan tahun 1595, yaitu sejak Fausto Veranzio menerbitkan jembatan gantung. Selanjutnya pada tahun 1941 dibangun jembatan rantai di Durham County, Inggris. Jembatan ini merupakan jembatan gantung pertama di Eropa.

Penggunaan kabel pada gedung tidak begitu cepat karena pada saat itu belum ada kebutuhan akan bentang yang sangat besar. Struktur paviliun pada pameran Nijny-Novgorod yang didesain oleh V. Shookhov pada tahun 1896 dianggap sebagai awal mulanya aplikasi kabel pada gedung modern.

*) Ir. (UNDIP), Staf Pengajar Jurusan Arsitektur Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, Semarang

Struktur-struktur yang dibangun berikutnya adalah paviliun Lokomotif pada Chicago World's Fair pada tahun 1933 dan Livestock Judging Pavillion yang dibangun di Raleigh North Carolina sekitar tahun 1950. Sejak itu banyak dibangun gedung yang menggunakan struktur kabel.

Pada masa sekarang struktur kabel banyak dipakai untuk menyelesaikan kasus-kasus bangunan dengan bentang lebar. Salah satu contoh bangunan yang banyak menggunakan struktur kabel adalah stadion yang mempunyai bentang sangat lebar dan diharapkan elemen struktur yang ada tidak menghalangi penonton ke tengah lapangan. Untuk itu penyelesaian dengan struktur kabel merupakan pilihan yang tepat.

Sampai saat ini sudah banyak stadion yang menggunakan struktur kabel dalam penyelesaian struktur atapnya. Salah satunya adalah National Athletics Stadium yang terletak di Bruce Australian Capital Territory.

Tinjauan Teori

Dasar-dasar Struktur Kabel

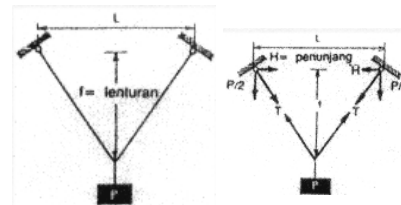
Struktur kabel bekerja berdasarkan gaya tarik, menggunakan sistem statis tertentu, dimana $\Sigma M=0$, $\Sigma H=0$, $\Sigma V=0$. pada sistem struktur dituntut sistem yang stabil dengan kabel yang tegang.

Daya tarik tinggi dari baja dengan efisiensi tarik murni memungkinkan baja

sebagai elemen struktur yang dapat membentangi jarak besar. Kabel adalah fleksibel karena ukurannya dari sisi kecil dibandingkan dengan panjangnya. Fleksibel menunjukkan daya lengkung yang terbatas.

Karena tegangan-tegangan lengkung tidak sama, dapat diatasi oleh fleksibelnya kabel. Beban-beban yang dipikul oleh batang-batang tarik terbagi diantara kabel-kabel. Masing-masing kabel memikul beban dengan tegangan yang sama dan di bawah tegangan yang diperkenankan.

Untuk dapat gambaran mengenai mekanisme kabel yang memikul beban vertikal, maka dijelaskan dengan gambar di bawah ini.



1. kabel dengan beban simetris
2. Penunjang kabel diperlukan

Pada gambar tersebut terlihat suatu kabel yang ujung-ujungnya dipegang kuat oleh angkur pada tembok dan dibebani beban P ditengahnya. Karena beban P , kedua bagian kabel tertarik dan membentuk segitiga, setiap bagian kabel memikul $\frac{1}{2} P$.

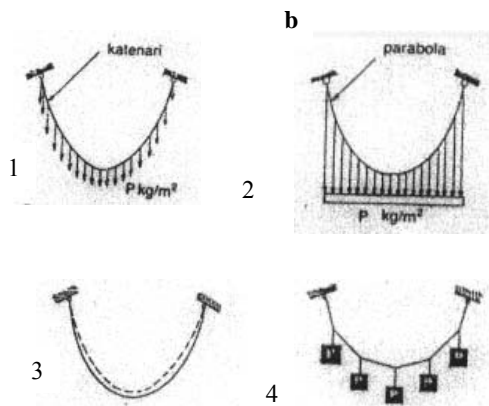
Bentuk segitiga yang terbentuk oleh kabel ada ciri khasnya pada lenturan, yaitu jarak vertikal antara landasan gantung sampai dengan titik terendah pada kabel. Kabel tanpa lenturan tak dapat memikul beban karena gaya tarik pada

kabel yang mendatar tidak dapat mengadakan keseimbangan dengan gaya atau beban vertikal. Gaya tarik arah kedalam pada kedua landasan akibat melenturnya kabel dapat dibagi dalam dua bagian yang sama karena pembebanan simetri.

Bilamana landasan perletakan tidak cukup kuat, maka kedua bagian kabel akan berimpit menjadi satu. Untuk mengatasi hal itu perlu dipasang batang penunjang mendatar antara kedua landasan.

Lenturan yang besar menambah panjang kabel, tetapi tegangan menjadi lebih rendah sehingga dapat dipakai kabel dengan potongan lintang yang kecil. Sebaliknya apabila lenturannya kecil, panjang kabel dapat berkurang, tetapi tegangan menjadi lebih besar, jadi diperlukan kabel dengan potongan lintang yang besar.

Yang paling ekonomis adalah dengan mengambil lenturan dengan sudut 45°.

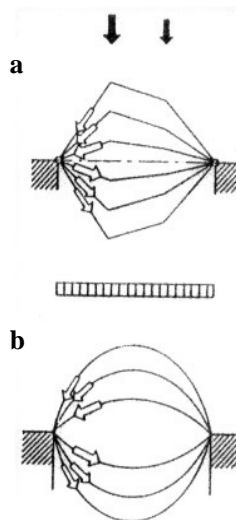


1. Garis katenari pembebanan merata sepanjang kabel
2. Garis pada pembebanan horizontal merata
3. Garis parabola hampir berhimpitan dengan katenari
4. Polygon yang funikuler

Apabila beban diperbanyak, maka kabel-kabel dengan garis-garis lurus karena tegang membentuk segi banyak. Bentuk segi banyak itu disebut dalam bahasa inggris: *funicular polygon* dari bahasa latin: *funis*: tali dan dari bahasa Yunani: *poly*: banyak dan *gonia*: sudut.

Kabel Sebagai Struktur Funicular

Secara alami bentuk funicular akan diperoleh

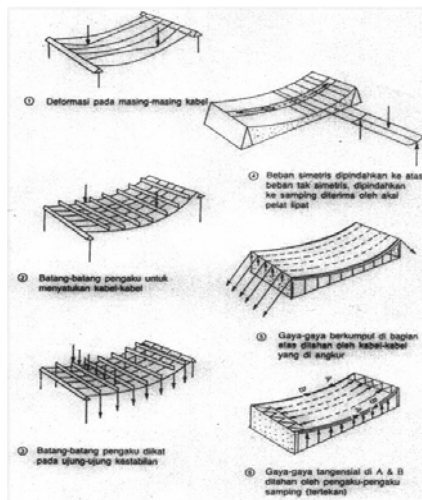


- a. Beban terpusat : kumpulan bentuk funicular untuk beban tipikal. Apabila tinggi struktur funicular berkurang, maka gaya dalam akan bertambah, dan begitu pula sebaliknya.
- b. Kumpulan beban terdistribusi secara horizontal.

apabila kabel yang bebas berubah bentuk kita bebani. Kabel yang berpenampang melintang konstan dan hanya memikul berat sendirinya akan mempunyai bentuk katenari. Kabel yang memikul beban vertikal yang terdistribusi secara horizontal di sepanjang kabel, seperti beban utama pada jembatan gantung yang

memikul dek horizontal, akan mempunyai bentuk parabola. Kabel yang memikul beban terpusat (dengan mengabaikan bentuk sendirinya) akan mempunyai bentuk segmen-segmen garis lurus. Kombinasi berbagai beban akan memberikan bentuk kombinasi dimana beban terbesar akan memberikan bentuk yang dominan. Bentuk pelengkung untuk beban yang sama merupakan kebalikan sederhana dari bentuk yang telah disebutkan di atas.

Besar gaya yang timbul pada kabel bergantung pada tinggi relatif bentuk funicular dibandingkan dengan panjangnya. Selain itu, besarnya juga bergantung pada lokasi dan besar beban yang bekerja (lihat gambar di bawah).



Semakin tinggi kabel, berarti semakin kecil gaya yang akan timbul dalam struktur, begitu pula sebaliknya. Gaya reaksi yang timbul pada ujung-ujung

kabel juga bergantung pada parameter-parameter tersebut. Reaksi ujung mempunyai komponen vertikal dan horizontal yang harus ditahan oleh pondasi atau elemen struktural lainnya, misalnya batang tarik.

Struktur Atap Kabel dan Penunjang

Atap tarik sederhana terdiri atas kabel-kabel yang digantung di atas kolom penunjang. Kabel menahan lengkung dan diberi angkur pada landasan di atas tanah. Balok-balok atau pelat-pelat lurus ditempatkan di atap-atap menghubungkan kabel-kabel yang sejajar dan dengan demikian terbentuklah atap dengan lengkungan barrel yang terbalik.

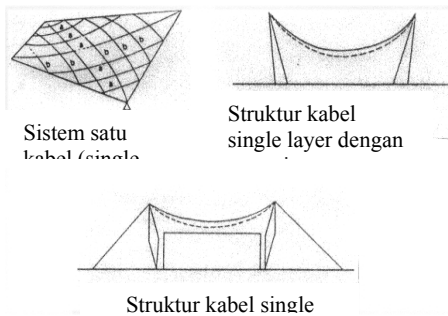
Kesederhanaan dan murahnya biaya sistem jembatan gantung untuk atap menarik perhatian. Akan tetapi pelat-pelat lurus penghubung kabel beserta kabel-kabelnya berbobot ringan, sehingga atap mudah mengepak-ngepak seperti sayap (*to flutter*), terbalik melencong (*to oscillate*) dan menggetar (*vibration effect*), apabila terkena angin kencang. Untuk mengatasi hal itu, maka bahan atap harus diambil yang agak berat atau kabel-kabel harus dibuat stabil dengan kabel sekunder atau kabelnya diberi pengaku.

Struktur Kabel Tunggal Sistem Roda Sepeda (Single Layer System)

Penutup atap terdiri dari pelat beton prafabrikasi berbentuk baja yang didukung oleh kabel-kabel radial. Ujungnya ditekuk ke atas pada tulangan pelat. Supaya stabil, pelat-

pelat dibebani bata atau kantong-kantong berisi pasir sementara untuk memberi tarik tambahan pada kabel-kabel.

Lubang-lubang di antara dua pelat sebagai cetakan diisi adukan beton. Bilamana beton mengering, atap menjadi pelat yang monolit dan merupakan bundaran.

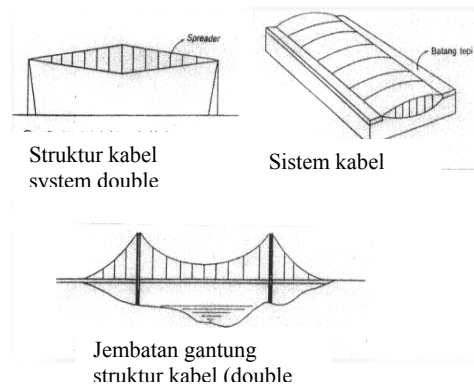


Jadi atap beton yang melengkung ke bawah itu mendapat prategang dari kabel-kabel, sehingga cukup kaku untuk menahan *flutter effect*.

Struktur Kabel Dua Ganda Sistem Roda Sepeda (double layer system)

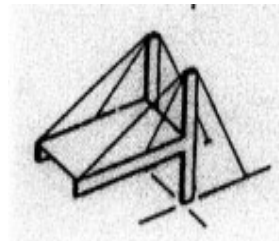
Sistem kabel ganda terdiri atas dua susunan kabel yang letaknya tidak sebidang, tidak berpotongan tetapi bersilangan. Kedua susunana kabel ini merupakan struktur utama dari atap, susunan yang satu melengkung ke atas dan susunan yang lainnya melendut

kebawah. Kedua susunan kabel dijaga supaya tetap pada tempatnya oleh penunjang-penunjang tekan dengan



berbagai panjang yang masing-masing dapat disetel.

Efek Dinamis Angin terhadap Struktur Kabel



Struktur cable stayed

Masalah kritis dalam desain setiap struktur atap yang menggunakan kabel adalah efek dinamis yang diakibatkan oleh

angin. Apabila angin bertiup di atas atap, akan timbul gaya isap. Apabila besar isapan akibat angin ini melampaui beban mati struktur atap itu sendiri, maka permukaan atap akan mulai naik. Pada saat atap mulai naik dan bentuknya menjadi sangat berubah, gaya di atas atap akan sangat berubah karena besar dan distribusi gaya angin pada suatu benda bergantung pada bentuk benda tersebut. Karena gaya angin berubah, maka struktur fleksibel tersebut akan berubah bentuk lagi sebagai respon terhadap beban yang baru ini. Proses ini akan berulang

terus sehingga atap tidak mempunyai bentuk tetap, dan akan bergetar (flutter) selama ada gaya angin. Untuk mencegahnya dengan menggunakan permukaan atap yang berat sehingga flutter dapat dicegah oleh beban matinya atau dengan menggunakan sistem kabel menyilang (*stayed cable*).

Studi Kasus

Kasus yang kami ambil adalah penggunaan struktur kabel pada sebuah stadion olahraga.



Rangka atap baja ditarik oleh kabel-kabel yang dikaitkan pada tiang penggantung

Nama : National Athletics Stadium (Bruce Stadium)

Tim proyek :
Arsitek (Philip Cox, Taylor and Partners)
Sipil (Bond James and Laron)
Service engineers (Julius Poole and Gibson)

Builder (Leighton Contractors)

Fungsi : tempat pertandingan nasional dan internasional dan sebagai markas tim Canberra Raiders ARL.

Tahun : 1977

Lokasi : Bruce , Australian Capital Territory

Tipe : Stadion

Bentuk : Plan (denah): atap panjang 112m, lebar 20m ,denah berbentuk segiempat.

Tinggi sampai atap: 16-20 m

Modul dasar atap : rectangular steel frame, with concrete topping

Modul : 14

Lantai : 11.400 sq m

Material : baja

Tipe struktur atap : tipe cable suspended steel framed roof deck

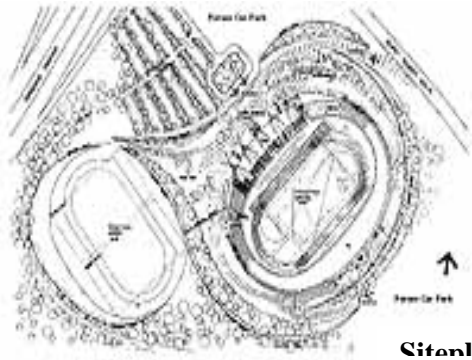
Motif surface arrangement

Struktur pendukung : Pin jointed masts dengan diameter kabel 36mm dan 52mm untuk kabel penarik di belakang.

Pondasi : rock tension anchors for the cables , piers to the main seating structure

Dirancang untuk menjadi bagian dari Institut Olahraga Australia. Diginakan sebagai tempat pelaksanaan kompetisi olahraga nasional dan internasional. Secara konsep, struktur utama dirancang khusus dalam penampilannya dan

dapat terlihat jelas dari jarak yang jauh. Bangunan utama didesain untuk menampung 6000 tempat duduk yang terlindungi.



Tampak bangunan

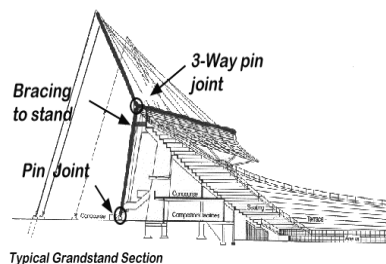
Fasilitas bagi atlet terletak pada struktur dasar dari atap, memberi hubungan langsung ke arena. Fasilitas lainnya seperti toko perlengkapan, restoran dan bar, serta fasilitas perawatan juga terdapat pada dasar tersebut. Tempat duduk di atasnya memungkinkan seluruh penonton untuk mendapatkan pandangan penuh pada semua kegiatan. Atap tergantung pada kabel yang didukung

oleh tiang-tiang baja runcing yang memberi dampak visual pada bangunan. Hal ini juga diperlukan untuk memberikan pandangan bebas kolom bagi para penonton. Struktur diletakkan seperti pada atap yang memiliki perlindungan maksimal dari angin yang sangat kuat di area.

Analisa Kabel Struktur

Kabel struktur mendukung atap seluas 112x20 m. Terdapat 5 tiang struktur disepanjang atap. Tiang ini dihubungkan dengan tiga penggantung ke balok atap dan kolom baja yang runcing. Tiap kabel mendukung 650 titik beban pada atap. Atap kabel berdiameter 36 mm, kabel penggantung belakang berdiameter 52 mm yang dibuat dari 37x7mm kabel. Terdapat 2 penggantung belakang untuk setiap tiang struktur penggantung dan 9 kabel yang mendukung atap. Tiang-tiang digantung pada kaki tiang ke kolom yang dikaitkan di dinding belakang dari tiang, dengan demikian memungkinkan tiang untuk diputar dalam, sesuai bidang perpanjangan dari tempat berdirinya.

Balok baja persegi kosong (tidak masif) yang membentuk atap dipasang pada ujung rangka beton dari tempat duduk. Slab beton 100mm kemudian diberi dek metal yang telah dibuat menjadi rangka atap dan bersifat permanen. Ini kemudian menjadi beban mati untuk menjadi penahan pada saat angin kencang. Sementara

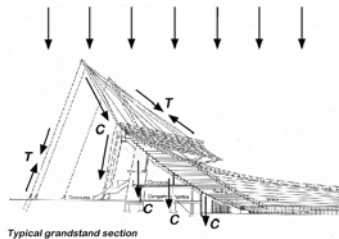


Typical Grandstand Section

Hubungan tiang penggantung, kolom dan rangka atap

itu, tiang dimiringkan ke depan, kemudian kabel penggantung belakang dipasang pada kepala tiang yang kemudian dikembalikan pada posisi akhirnya, memungkinkan ujung yang lebih rendah dari kabel penggantung belakang untuk dihubungkan pada angkur di tanah. Kabel penggantung belakang kemudian ditegangkan secara berpasangan yang menyebabkan atap kabel dapat memikul beban.

Hinged Masts (tiang penggantung)



Alir pembebanan gaya

Panjang tiang penggantung 16 m dari ujung kepala hingga 3 way pin joint. Ini adalah baja runcing fabrikasi yang menjadi satu dengan cast element pada ujungnya yang memungkinkan hubungan kabel. Terdapat 5 tiang yang masing-masing diletakkan pada bagian belakang penyangga, kemudian dimiringkan dengan sudut 60° agar stabil.

Tapered Columns (kolom runcing)

Kolom-kolom runcing membentuk satu bagian dari 3 struktur baja utama. Kolom-kolom ini bervariasi menurut ukuran panjangnya mulai dari 16m hingga 20m, tergantung pada posisi peletakan pada strukturnya. Kolom ini dihubungkan pada

dua ujungnya untuk memungkinkan terjadinya rotasi perpendicular pada penyangganya.

Roof Frame (rangka atap)

Rangka atap terdiri dari balok baja utama yang membentang sekitar 20m dihubungkan dengan tiang dan kolom-kolom. Balok utama ini membentuk bagian pada kerangka atap baja yang menyangga dek metal yang mendukung beton penutup atas. Penetrasi yang menembus beton penutup atas memungkinkan terjadinya hubungan pada rangka atap baja supaya kabel yang tegang dapat menggantung atap. Tepi atap dijepit pada struktur beton untuk mengatasi gaya lateral dan gaya keatas. Beton tegak di tepi atap mengurangi kibaran atap.

Tension Cables (kabel tegang)

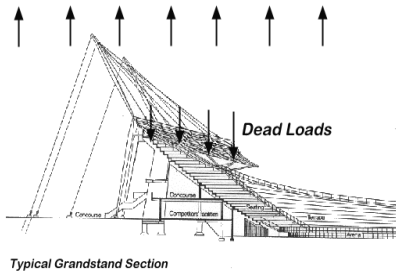


Angkur batu

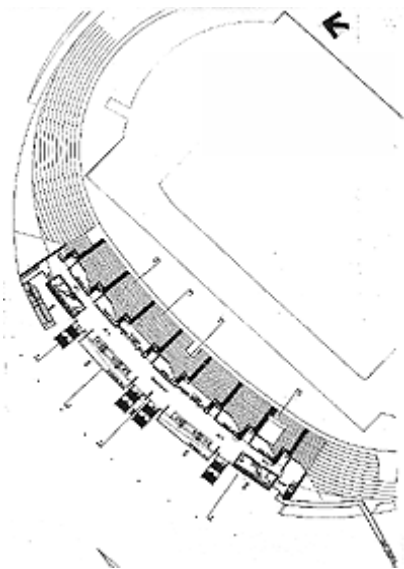
Kabel atap terdiri dari 19 X 7 mm kawat yang menyusun kabel berdiameter 36 mm. Terdapat 9 kabel atap untuk tiap tiang penyangga atap yang diseimbangkan dengan dua kabel

penggantung belakang yang diangkurkan ke tanah. Kabel penggantung belakang disusun oleh kawat 37 X 7 mm, yang membentuk kabel berdiameter 52 mm. Ini dapat memikul beban hingga 600-700 kN. Kabel penyangga belakang dihubungkan ke angkur batu melalui cetakan yang mempunyai lubang runcing dan mengandung epoksi, serbuk besi (zinc dust), dan bola pemikul (ball bearings).

Structural Action (Aksi Struktur)



Beban lateral pada arah transversal disebabkan oleh dua efek. Yang pertama adalah beban terpusat yang disalurkan dari sistem struktur sekunder untuk dinding, yang akan menjadi bentuk beban terpusat pada tepi timur dan barat dari diagrid yang terbentuk pada setiap 12,6 m.



Denah

Yang kedua adalah gaya tarik pada atap dan resultan komponen tekanan angin horisontal yang dihasilkan oleh beban angin tidak simetris. Hal ini sebagian besar dinetralkan oleh ikatan eksternal dan dinding penopang. Tiang penopang tepi menjadi subjek efek fleksural saat menyalurkan beban-beban tersebut ke titik-titik pendukung, disebabkan oleh gaya tekan dan daya regang pada bagian-bagiannya. Diagrid juga akan membantu penyaluran beban ke pendukung dengan mengembangkan daya tegang dan gaya regang pada bagian-bagiannya.

Beban lateral pada arah longitudinal disebabkan oleh dua efek yang serupa dengan yang terjadi pada arah transversal. Beban-beban dibebankan secara singkat pada diagrid, yang kemudian disalurkan pada dinding penopang melalui tiang penopang tepi dan ikatan internal. Bagian-bagian diagrid akan mengembangkan gaya tekan dan gaya regang dalam menahan dan menyalurkan beban-beban. Satu perangkat ikatan internal akan menjadi tegang untuk setiap beban lateral.

Kesimpulan

Struktur kabel sangat cocok digunakan pada atap stadion. Struktur kabel tidak membutuhkan kolom-kolom yang besar untuk menyalurkan beban, sehingga pandangan penonton ke arena pertandingan tidak terganggu. Selain itu penggunaan struktur kabel pada atap stadion dapat menambah nilai estetis bangunan.

Struktur kabel sebenarnya bisa digunakan di Indonesia, namun sampai saat ini belum dijumpai penggunaan struktur kabel pada atap stadion.

2. Schodek, Daniel L. 1998. Struktur. PT. Rafika Aditama. Bandung.
3. www.national_athletics_stadium.com

Daftar Pustaka

1. Frick, Heinz.1998.Sistem bentuk struktur bangunan.Kanisius.Yogyakarta.