

STRUKTUR KABEL: TEKNOLOGI DAN DESAIN¹

Harianto Hardjasaputra

Email: hardja@yahoo.com

Jurusan Teknik Sipil & Magister Teknik Sipil Universitas Pelita Harapan
UPH Tower, Lippo Karawaci, Tangerang 15811, Banten

ABSTRAK: Kabel sebagai material konstruksi sudah dikenal sejak jaman Mesir kuno. Pada saat itu kabel dibuat dari serat alami. Pada abad pertengahan Leonardo da Vinci (1452 – 1519) sudah membuat sketsa gambar konstruksi jembatan dengan sistem kabel-kabel penahan girder jembatan. Sejak akhir abad ke-19, mulai digunakan kabel-kabel dari bahan metal besi/baja, di mana penggunaannya masih terbatas untuk konstruksi jembatan berbentuk lebar. Tetapi kini para arsitek pun dapat menggunakan struktur kabel untuk menciptakan bangunan dengan ruangan dalam yang luas, dengan kesan ringan, anggun, dan transparan. Makalah ini membahas beberapa aspek yang penting pada struktur kabel dari segi teknologi dan desain.

KATA KUNCI : struktur kabel, bentang lebar tanpa kolom, ringan, anggun, transparan

ABSTRACT: Cable as construction material has been known since old Egypt. At that time, cable was made from natural fiber. The sketch from Leonardo da Vinci (1452 – 1519) about bridge utilizing cable to support has been found. Since the late of 1900, cable from steel has been use for long span bridges, and now the architect can use structural cable to create building with wide span space without column that seem light, elegant and transparent. This paper deals with several aspects in structural cable, their technology and design.

KEY WORDS : structural cable, wide span without column, light, elegant, transparent

Pendahuluan

Berkembangnya penggunaan kabel baja sebagai bahan struktur pada berbagai jenis bangunan, dari konstruksi jembatan ke konstruksi gedung sebagai penutup atap stadion olah raga, ruang pertemuan, ruang pameran, dan lain-lain, memerlukan tahapan konstruksi yang sangat rinci. Dukungan tenaga spesialis, yang menguasai *know – how* struktur kabel, amat diperlukan untuk menjamin tercapainya *performance* dan keunikan bentuk bangunan.

Diawali dengan konstruksi stadion untuk pesta olah raga olimpiade di Munich (Jerman) tahun 1972, para arsitek dan insinyur telah melakukan inovasi dan penelitian di bidang *engineering* dan *manufacture* struktur kabel dengan berbagai variasi bentuknya. Dengan struktur kabel, arsitek dapat menciptakan ruang dalam yang sangat luas tanpa kolom, dengan massa bangunan yang sangat ringan dan transparan.

Keuntungan struktur kabel terletak pada fleksibilitas pemakaian dan pra-pabrikasi pembuatannya, sehingga siap untuk dipasang di tempat konstruksi dan dapat dikerjakan dalam waktu yang singkat.

Beberapa aspek penting untuk proses pembangunan struktur kabel meliputi hal-hal sebagai berikut :

- *Form finding*, bentuk geometri struktur kabel
- Hitungan dan sistem pemberian gaya prategang
- Penentuan tipe dan jenis bahan kabel
- Penentuan panjang terpotong kabel dengan tepat

- Perancangan bentuk dan detil pemegang kabel
- Pemilihan pelindung terhadap bahaya korosi
- Proses pabrikasi dan pemasangan

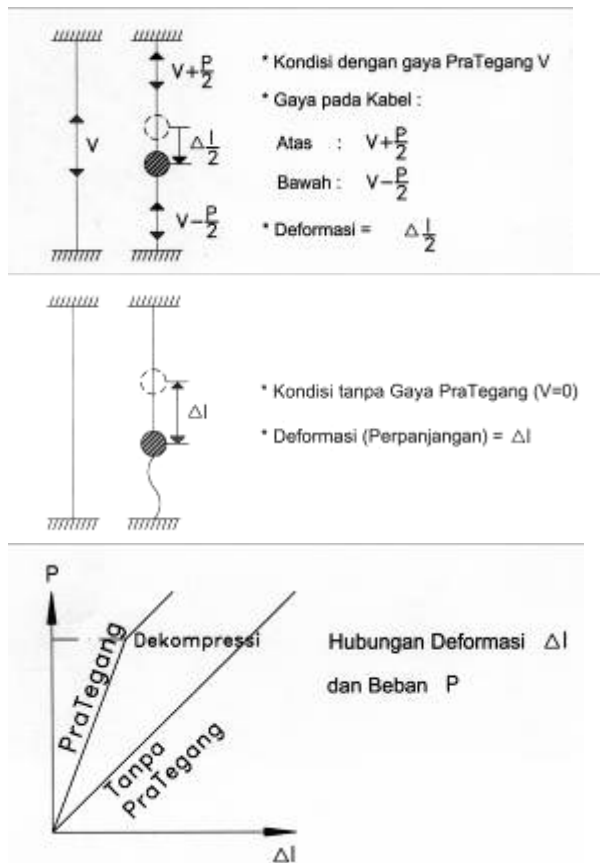
Untuk merancang dan melaksanakan pelaksanaan struktur kabel, penguasaan ketujuh aspek teknis ini memerlukan kerja sama erat antara insinyur struktur dan arsitektur. Berbeda pada bangunan standar, bentuk struktur kabel yang unik memerlukan peranan insinyur struktur lebih dominan dari pada arsitek. Sangat mendasar bila insinyur struktur tersebut mengerti akan segi estetika dari bentuk.

Mengapa Struktur Kabel Prategang ?

Teknik prategang, yang umumnya kita kenal pada struktur beton, tidak lain merupakan suatu rekayasa yang cerdas, di mana aplikasinya telah berdampak luar biasa pada perkembangan dunia teknik, termasuk juga pada penggunaan kabel sebagai bahan struktur.

Melalui teknik prategang, kabel sebagai elemen struktur yang tadinya hanya mampu memikul aksial tarik menjadi elemen struktur yang mampu memikul aksial tekan dan mempunyai kekakuan lentur. Sedangkan gaya prategang yang diberikan pada struktur kabel ruang, harus mampu menstabilkan keseluruhan sistem struktur, sehingga untuk setiap kombinasi pembebanan kabel-kabel tetap dalam keadaan tarik. Perilaku struktur kabel yang diberi gaya prategang dapat kita pelajari dari percobaan seperti pada Gambar 1.

¹, Invited Paper – Seminar “Solusi Inovatif dalam Desain / Kegagalan Struktur Teknik Sipil”, UPH, 19/10/2005



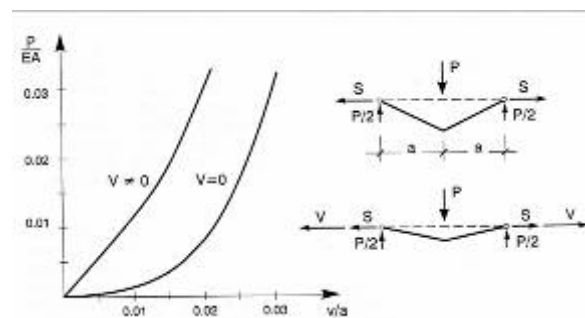
Gambar 1. Perilaku Kabel dan Efek Prategang

Kita rentangkan 2 tali karet (atau kabel yang cukup elastis), satu tali direntangkan tanpa dikencangkan, artinya tanpa gaya prategang ($V = 0$), sedangkan tali yang lain dikencangkan, artinya diberi gaya prategang ($V \neq 0$). Bila di tengah ketinggian setiap tali digantungkan beban P , pada tali di mana $V = 0$ bagian atas meregang sebesar Δl , dan bagian bawah tali akan terlipat. Sedangkan tali di mana $V \neq 0$ bagian atas hanya akan meregang sebesar setengah Δl . Hal ini disebabkan sekarang beban P dipikul baik oleh bagian atas dan bagian bawah tali, masing-masing sebesar 50 % beban P .

Dari grafik hubungan P dan Δl untuk kedua tali memperlihatkan bahwa tali dengan gaya prategang akan mempunyai deformasi yang jauh lebih kecil. Bila beban P sudah mencapai kondisi *detension* (tegangan tali pada bagian bawah menjadi nol), maka grafik hubungan P dan Δl kembali menjadi paralel dengan grafik untuk tali tanpa tegangan.

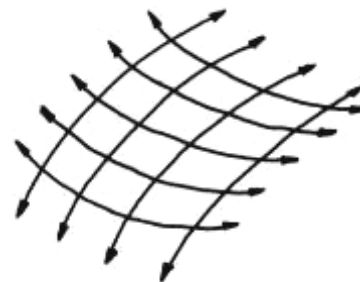
Bila kedua tali sekarang dibebani dengan beban terpusat P seperti pada Gambar 2, maka grafik P dan Δ kedua tali tersebut memperlihatkan kabel dengan prategang ($V \neq \Delta$) mampu untuk memikul beban melintang secara lebih efektif, yaitu deformasi lenturnya menjadi jauh lebih kecil dibandingkan dengan Δ untuk tali tanpa prategang ($V = \Delta$). Dari

kedua contoh tersebut, terbukti bahwa gaya prategang pada kabel selain akan meningkatkan “kekakuan” arah aksial juga akan meningkatkan lenturnya.



Gambar 2. Deformasi kabel dan Efek Gaya Prategang Terhadap Pembeban (Schlaich dan Wagner 1992)

Teknik prategang akan lebih efektif bila digunakan pada jaringan kabel untuk atap bangunan yang dirancang sebagai geometri ruang (3D) yang mempunyai bentuk lengkung ganda yang saling berlawanan (anti klastis) atau bentuk pelana, di mana kedua kabel yang saling bersilangan tersebut mempunyai pusat lengkung berlawanan dengan posisi di atas dan di bawah (Gambar 3). Dengan demikian gaya prategang pada kedua kabel tersebut, akan saling menstabilkan diri pada saat memikul beban luar.

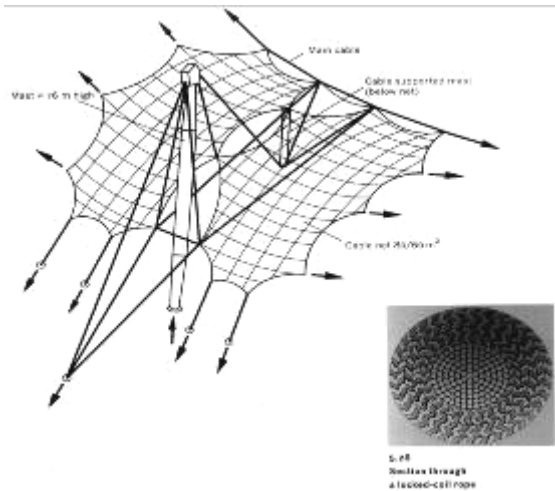


Gambar 3. Jaringan Kabel dengan Prategang Bentuk Lengkung Ganda Anti-klastis atau Pelana (Schlaich dan Wagner 1992)

Bila seluruh sistem jaringan kabel tersebut diberi gaya prategang, maka jaringan kabel mampu memikul berbagai kombinasi pembebanan luar.

Besarnya gaya prategang yang diberikan, harus diberikan sedemikian besarnya sehingga kita dapat menghindari adanya kabel dalam keadaan tanpa tegangan tarik (pasif). Hal ini untuk menghindari terjadinya penurunan kekakuan struktur, yang menyebabkan membesarnya deformasi.

Transfer gaya prategang pada jaringan kabel, dilakukan dengan memasang kabel utama pada tepi jaringan, di mana kabel utamanya harus dipasang dengan bentuk lengkung. Dengan cara menarik kabel utama ini, maka gaya prategang akan ditransfer pada seluruh jaringan kabel (Gambar 4).



Gambar 4. Prinsip transfer gaya prategang dari kabel tepi ke jaringan kabel (Holgates 1997)

Form Finding

Berbeda dengan perencanaan bangunan yang mempunyai bentuk standar seperti lingkaran, persegi, dan lain-lain, maka untuk struktur kabel yang digunakan untuk atap stadion ataupun lainnya dengan bentang sangat lebar, maka proses perencanaannya dimulai dengan pencarian bentuk geometrinya, dikenal sebagai metoda *form finding*. Proses ini diperlukan agar diperoleh bentuk atap yang unik dan estetik, tapi bentuk ini justru merupakan bentuk yang optimal ditinjau dari segi struktur.

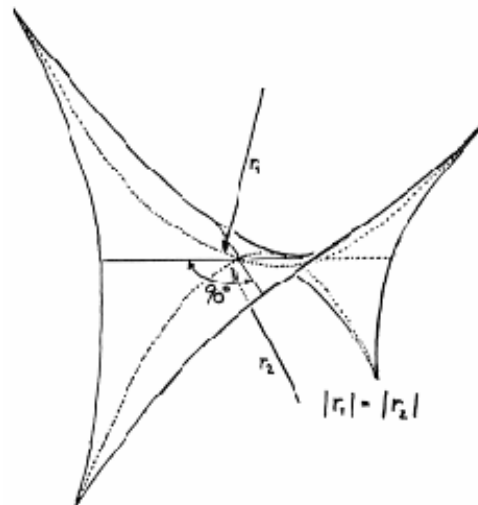
Per definisi, *form finding* adalah proses untuk menemukan bentuk struktur yang optimal, yaitu struktur yang bentuknya akan memberikan kondisi paling efisien dari segi penggunaan bahan konstruksinya. Kondisi ini dapat kita peroleh bila material konstruksi hanya mengalami tarik pada bidangnya (membran), tanpa adanya tegangan-tegangan akibat momen lentur.

Dari proses *form finding* akan dihasilkan bentuk 3D yang unik, yaitu bentuk lengkung ganda antiklastis atau bentuk pelana (Gambar 5), yang juga terbukti sangat efektif bila digunakan teknik prategang padanya. Kabel sebagai material yang fleksibel, dapat kita pakai sebagai elemen struktur yang dengan mudah dapat mengikuti bentuk optimal ini.

Proses *form finding* dilakukan pada saat pradesain sampai ke tahap desain konsep bangunan, dan dikerjakan dengan melakukan berbagai eksperimen untuk mendapatkan variasi bentuk bangunan. Setelah ada kepastian bentuk geometrinya, maka secara tepat geometri bangunan akan dihitung dengan metoda matematik numerik.

Adapun perhitungan matematik numerik diturunkan berdasarkan prinsip permukaan minimum, yaitu suatu

gejala fisika yang kita temukan pada *form finding* dengan menggunakan gelembung sabun.



Gambar 5. Bentuk Pelana dari Proses *form finding*

Kini sudah tersedia program komputer yang bisa men"generate" bentuk geometri berdasarkan kondisi-kondisi batas yang telah ditetapkan (Gambar 6).



Gambar 6. Tampak Isometri dari Atap Stadion, Hasil *Form Finding* dengan Bantuan Komputer (Holgates, 1997)

Sedangkan jenis bahan yang dipakai pada proses *form finding* disesuaikan dengan jenis struktur yang akan dihasilkan. Pada awal perkembangannya, untuk struktur kabel dan struktur membran, Frei Oto menggunakan air sabun dalam proses *form finding*. Untuk segi praktisnya dapat pula digunakan kain kasa nilon.

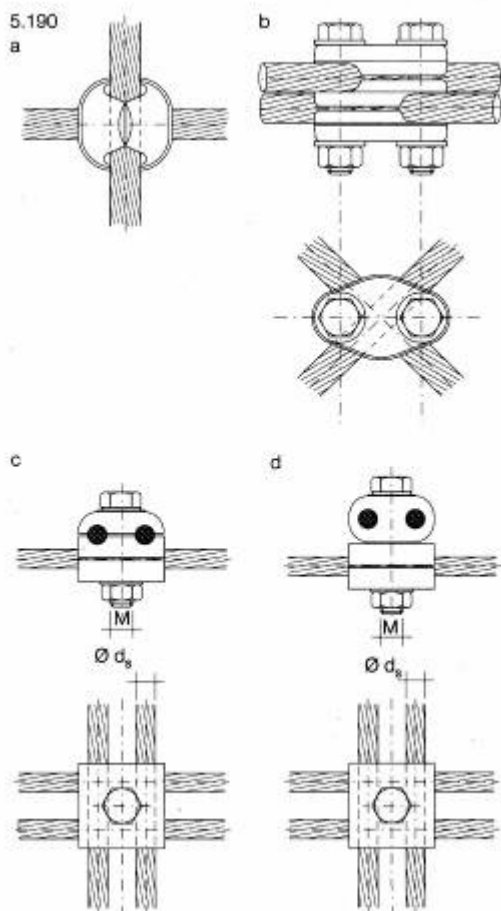
Detail Dan Sistem Pengakhiran Kabel

Struktur kabel 3D (ruang) membagi pembebanannya melalui elemen tarik seperti halnya pada sistem rangka batang, dimana resultan gayanya bisa bertemu pada satu titik ataupun dari titik pertemuan ini garis resultan gayanya harus berubah atau berbelok.

Yang penting untuk diperhatikan, adalah bahwa pada perancangan struktur kabel, untuk semua kombinasi pembebanan seluruh kabel berada dalam keadaan tarik.

Karena elemen-elemen struktur kabel ini umumnya tidak selalu bersilangan secara orthogonal, diperlukan desain bentuk dari titik pertemuan antara kabel. Setiap titik pertemuan dari kabel selain harus memenuhi syarat kekuatan dan kemudahan pemasangan, juga harus dipertimbangkan secara estetika.

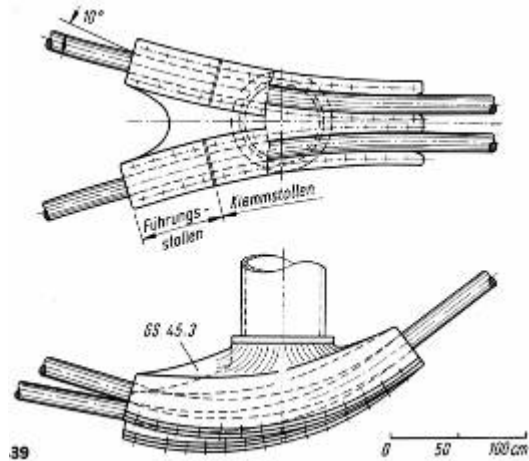
Sesuai fungsinya titik pertemuan dari kabel-kabel tersebut dapat dikategorikan dalam beberapa bentuk simpul untuk persilangan dari 2 atau 4 kabel. Sifat dari pemegang persilangan ini dapat dibedakan dalam 2 sistem, yaitu: sistem di mana sifat persilangan tidak dapat berotasi (fix) dan sistem dimana persilangan masih dapat bergeser dan berotasi (Gambar 7).



Gambar 7. Berbagai Bentuk Simpul untuk Persilangan Kabel (Schulitz et al. 1999)

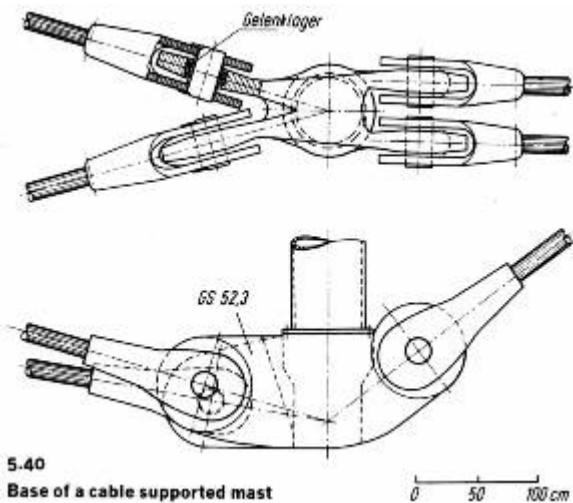
Dudukan Untuk Pelengkung Kabel

Sesuai dengan fungsinya resultan gaya pada kabel utama harus pula dapat dibelokkan. Sebagai lintasan dari pembelokan kabel utama umumnya digunakan konstruksi dudukan berbentuk pelana dengan radius tertentu (Gambar 8).



Gambar 8. Konstruksi untuk Dudukan Lintasan Pembelokan Kabel Utama (Holgates 1997)

Sedangkan bila diperlukan perubahan arah gaya di mana sudut beloknya kecil dan panjang kabelnya terbatas, maka direncanakan dengan sistem di mana kabel-kabel tersebut diputus pada daerah tersebut, untuk kemudian kabel-kabel tersebut akan bertemu pada konstruksi pelat simpul 3D (Gambar 9).



5.40 Base of a cable supported mast

Gambar 9. Konstruksi Simpul 3D Pertemuan Kabel Utama (Holgates 1997)

Pengangkuran

Seperti sudah dijelaskan, pemberian gaya prategang pada jaringan kabel dilakukan dengan menarik kabel utama pada ujung-ujungnya. Untuk itu diperlukan pengangkuran dan penarikan pada kabel utama.

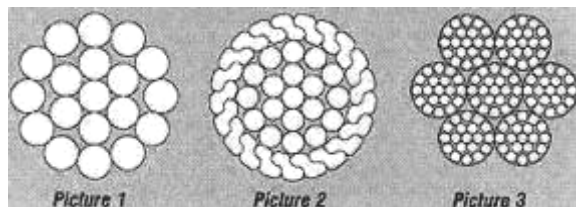
Ketiga tipe detil dari bentuk pertemuan ini merupakan aspek teknis yang harus dirancang dan diuji terlebih dahulu. Saat ini, untuk beberapa detail standar sudah tercantum dalam standard DIN.

Tipe Kabel

Kabel sesuai dengan keperluannya, terdiri dari berbagai macam tipe. Menurut standard DIN 18 800 semua kabel yang digunakan untuk struktur bangunan dikategorikan sebagai *high tensile members*.

Secara umum kabel-kabel tersebut mempunyai kekuatan rencana yang lebih tinggi dari pada batang tarik baja, sehingga dengan luas penampang yang sama dapat memikul beban lebih besar. Tetapi modulus elastisitas kabel adalah antara $E = 155.000 \text{ N/mm}^2$ sampai $E = 165.000 \text{ N/mm}^2$, jelas lebih rendah dari pada modulus elastisitas yang dipakai untuk batang tarik baja ($E = 210.000 \text{ N/mm}^2$).

Ada pula kabel yang mempunyai lapisan krom dan nikel, agar bersifat tahan terhadap karat. Untuk keperluan konstruksi bangunan, dikenal 3 tipe penampang kabel, yaitu *spiral strands*, *full locked coil cables* dan *structural wire ropes* (Gambar 10).



Gambar 10. Berbagai Tipe Kabel Konstruksi (*spiral strands*, *full locked coil cables* dan *structural ropes*)

Spiral strands terutama digunakan untuk bangunan di mana bebannya relatif kecil seperti untuk pendukung antena telekomunikasi, cerobong asap, ikatan angin (*bracing*) pada jaringan kabel, struktur kayu dan baja. *Spiral strands* diproduksi dengan diameter antara 5 mm sampai 40 mm. *Spiral strands* hanya terdiri dari kawat-kawat yang berpenampang lingkaran, akibat adanya celah-celah *spiral strand* dikelompokkan pada material yang kurang tahan terhadap bahaya korosi.

Full locked coil cables terutama digunakan sebagai kabel utama pada berbagai konstruksi, antara lain kabel utama pada *suspension bridge* dan *stay cables bridge*, kabel tepi pada jaringan kabel.

Sifat-sifat khusus dari *full locked coil cables*, adalah:

- Mempunyai E – modulus yang tinggi
- Permukaan kabel mempunyai daya tahan tinggi
- Permukaan kabel tertutup, sehingga tahan terhadap bahaya korosi

Penampang kabel bagian dalam atau bagian inti terdiri dari kawat-kawat dengan penampang lingkaran, sedangkan bagian luar, penampangnya berbentuk Z.

Structural wire ropes, terutama digunakan sebagai kabel tepi pada struktur membran (*textile structure*).

Kabel ini terdiri dari beberapa *strands*, sehingga sifatnya fleksibel.

Aplikasi Struktur Kabel

Bila pada awalnya struktur kabel banyak digunakan untuk berbagai jembatan, seperti *suspension bridge*, *cable stayed bridge*, dan lain-lain, tapi kini para arsitek pun dapat mewujudkan idenya melalui struktur kabel untuk mewujudkan ruang dalam yang sangat luas, “tanpa kolom”, tapi tetap mempunyai kesan ringan, anggun, transparan dengan bentuknya yang unik.

Struktur kabel yang paling banyak digunakan untuk atap stadion olah raga, karena stadion olah raga memang memerlukan ruang yang bebas kolom pada bagian dalamnya. Kombinasi struktur kabel dan tekstil merupakan solusi bagi keperluan untuk perancangan atap stadion olah raga yang dapat digerakkan tutup buka.

Sedangkan rancangan gedung masa kini makin banyak pula menggunakan struktur kabel sebagai “*suspended cable*” untuk dinding kaca dengan bidang yang luas, atau sebagai “*supported cable*” untuk rancangan atap kaca.

Perkembangan dalam arsitektur struktur kabel ini menunjukkan tantangan bagi para insinyur struktur, bahwa mereka seharusnya dapat berperan lebih dominan dalam membuat rancangan struktur kabel dibandingkan arsitek. Mereka tidak hanya “tukang hitung” saja, tapi mereka pun bertanggung jawab untuk segi estetika karena keindahan struktur kabel justru tampil dari elemen strukturnya sendiri.

Daftar Pustaka

- Frei, O. (1997). “Lightweight Principle”, Information of the Institut for Lightweight Structure, IL No. 24.
- Holgates, A. (1997). “The Art of Structural Engineering – The Work of J. Schlaich and His Team”, Edition Axel Menges, Stuttgart / London.
- Schlaich, J. dan Wagner, R. (1992). “Bauen mit Seilen”, Manuskript Institut für Tragwerksentwurf-und-Konstruktion – Universität Stuttgart.
- Schulitz, Sobek, Habermann. (1999). “Stahlbau Atlas”, Institut für Internationale Architektur – Dokumentation Gmb H, München.