

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Beton Prategang

Mengkombinasikan beton berkekuatan tinggi dan baja mutu tinggi dengan cara – cara “aktif”. Hal ini dicapai dengan cara menarik baja dan menahannya kebeton sehingga beton dalam kondisi tertekan sebelum mengalami beban tekan itu sendiri. Kombinasi aktif menghasilkan perilaku lebih baik yang berkekuatan tinggi. (*Desain Beton Prategang edisi ke 3 jilid 1, T.Y lin & Ned H. Burns*).

Beton prategang adalah beton bertulang yang telah diberikan tegangan tekan dalam untuk mengurangi tegangan tarik potensial dalam beton akibat beban kerja. (*SNI 03 – 2847 - 2002*).

1. Sejarah Beton Prategang dan Perkembangannya

Beton prategang pertamakali ditemukan oleh Insinyur perancis yaitu *Eugene Freyssinet* pada 1933 di *Gare Maritime pelabuhan LeHavre* (*Perancis*). Ia mengemukakan bahwa untuk mengatasi rangkai, relaksasi dan slip pada jangkar kawat atau pada kabel maka digunakan beton dan baja yang bermutu tinggi. Disamping itu ia juga telah menciptakan suatu sistem panjang kawat dan sistem penarikan yang baik, yang hingga kini masih dipakai dan terkenal dengan system *FREYSSINET*.

Freyssinet sebagai bapak beton prategang dunia segera diikuti jejaknya oleh para ahli lain untuk mengembangkan jenis struktur beton ini, yaitu :

- a. *Yves Guyon* adalah seorang insinyur Perancis dan telah menerbitkan buku Masterpiecenya "*Beton Precontraint*" (2 jilid) pada tahun 1951. Beliau memecahkan kesulitan dalam segi perhitungan struktur dari beton pratekan yang diakibatkan oleh gaya-gaya tambahan disebabkan oleh pembesian pratekan pada struktur yang mana dijuluki sebagai "Gaya Parasit" maka Guyon dianggap sebagai yang memberikan dasar dan latar belakang ilmiah dari beton pratekan.

- b. T.Y. Lin adalah seorang insinyur kelahiran Taiwan yang merupakan guru besar di California University, Merkovoy. Keberhasilannya yaitu mampu memperhitungkan gaya-gaya parasit yang terjadi pada struktur. Ia mengemukakan teorinya pada tahun 1963 tentang "*Load Balancing*". Dengan cara ini kawat atau kabel prategang diberi bentuk dan gaya yang sedemikian rupa sehingga sebagian dari beban rencana yang telah ditetapkan dapat diimbangi seutuhnya pada beban seimbang ini. Didalam struktur tidak terjadi lendutan dan karenanya tidak bekerja momen lentur apapun, sedangkan tegangan beton pada penampang struktur bekerja merata. Beban-belan lain diluar beban seimbang (beban vertikal dan horizontal) merupakan "*Inbalanced Load*", yang akibatnya pada struktur dapat dihitung dengan mudah dengan menggunakan teori struktur biasa. Tegangan akhir dalam penampang didapat dengan menggunakan tegangan merata akibat "*Balanced*" dan tegangan lentur akibat "*Unbalanced Load*". Tanpa melalui prosedur rumit dapat dihitung dengan mudah dan cepat. Gagasan ini telah menjurus kepada pemakaian baja tulangan biasa disamping baja prategang, yaitu dimana

baja prategang digunakan memikul akibat dari *Inbalanced Load*. Teori "*Inbalanced Load*" telah mengakibatkan perkembangan yang sangat pesat dalam menggunakan beton pratekan dalam gedung-gedung bertingkat tinggi. Struktur flat slab, struktur shell, dan lain-lain. Terutama di Amerika dewasa ini boleh dikatakan tidak ada gedung bertingkat yang tidak menggunakan beton pratekan didalam strukturnya. T.Y. Lin juga telah berhasil membuktikan bahwa beton pratekan dapat dipakai dengan aman dalam bangunan-bangunan didaerah gempa, setelah sebelumnya beton pratekan dianggap sebagai bahan yang kurang kenyal (*ductile*) untuk dipakai didaerah-daerah gempa, tetapi dikombinasikan dengan tulangan baja biasa ternyata beton pratekan cukup kenyal, sehingga dapat memikul dengan baik perubahan-perubahan bentuk yang diakibatkan oleh gempa.

2. Kelebihan dan Kekurangan Beton Prategang.

Kelebihan beton prategang :

- a. Dapat dipakai pada bentang-bentang yang besar
- b. Bentuknya langsing, berat sendiri lebih kecil, lendutan lebih kecil
- c. Beton mutu tinggi, tidak mudah retak, lebih aman.
- d. Lebih ekonomis apabila dipakai pada bentang-bentang yang besar

Kekurangan beton prategang :

- a. Menggunakan alat-alat pelengkap (dongkrak, jangkar, pipa pembungkus, alat untuk memompa martel, dan lain-lain) dan juga diperlukan pengawasan pelaksanaan yang ketat.

- b. Hanya dapat memikul beban dalam satu arah, kurang cocok untuk pembebanan bolak balik.
 - c. Adanya kehilangan gaya prategang akibat dari sifat beton, teknis pelaksanaan dan friksi.
3. Bahan – bahan pembentuk beton prategang
- a. Semen portland
 - Semen portland tipe I, dipakai untuk bangunan biasa. Penggunaan semen portland tipe I untuk bangunan yang tidak memerlukan persyaratan khusus dan untuk tanah atau air dengan kadar sulfat maksimum 10% juga untuk gedung bertingkat.
 - Semen portland Tipe II mempunyai kalor perkerasan sedang dan memiliki ketahanan sulfat sedang. Penggunaan semen portland tipe II untuk tanah atau air dengan kadar sulfat 10-20% serta untuk bangunan massa seperti dam dan kepala jembatan
 - Semen portland tipe III semen dengan kekuatan awal yang tinggi. kadar C_3S lebih banyak dari semen portland tipe lainnya. Semen portland tipe III dipakai untuk konstruksi bangunan yang memerlukan kekuatan awal tinggi, misalnya pembuatan jalan beton
 - Semen portland tipe IV memiliki kalor hidrasi rendah. Kadar C_3A dan C_3S lebih rendah dari semen portland tipe lainnya. Kadar C_4AF lebih tinggi karena adanya Fe_2O_3 untuk mengurangi kadar C_3A .
 - Semen portland tipe V memiliki ketahanan terhadap agresi sulfat tinggi. Semen ini mempunyai kadar C_3A rendah dan kadar C_4AF

tinggi. Penggunaan semen portland tipe V untuk bangunan pengolah limbah dengan kadar sulfat lebih dari 20%.

b. Agregat

Agregat adalah material granural, misalnya pasir, kerikil, batu pecah, dan kerak tungku besi, yang dipakai bersama-sama dengan suatu media pengikat untuk membentuk suatu semen hidraulik atau adukan.

Agregat diperoleh dari sumber daya alam atau agregat dapat juga diperoleh dengan memecah batuan induk yang lebih besar.

c. Baja

Baja untuk beton prategang terdiri dari:

- Kawat baja
- Untaian kawat (*strand*)



Gambar 1. Strand 7 kawat

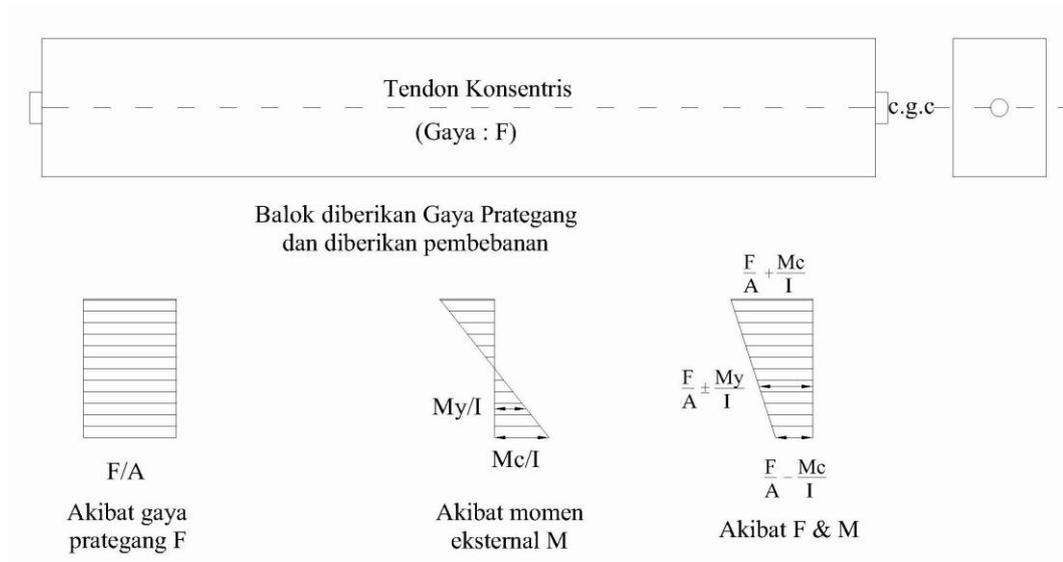
Tabel 1. Spesifikasi strand 7 kawat

Ø Nominal (mm)	Luas Nominal mm ²	Kuat Putus (kN)
6,35	23,22	40
7,94	37,42	64,5
9,53	51,61	89
11,11	69,68	120,1
12,70	92,9	160,1
15,24	139,35	240,2

4. Konsep Dasar Beton Prategang

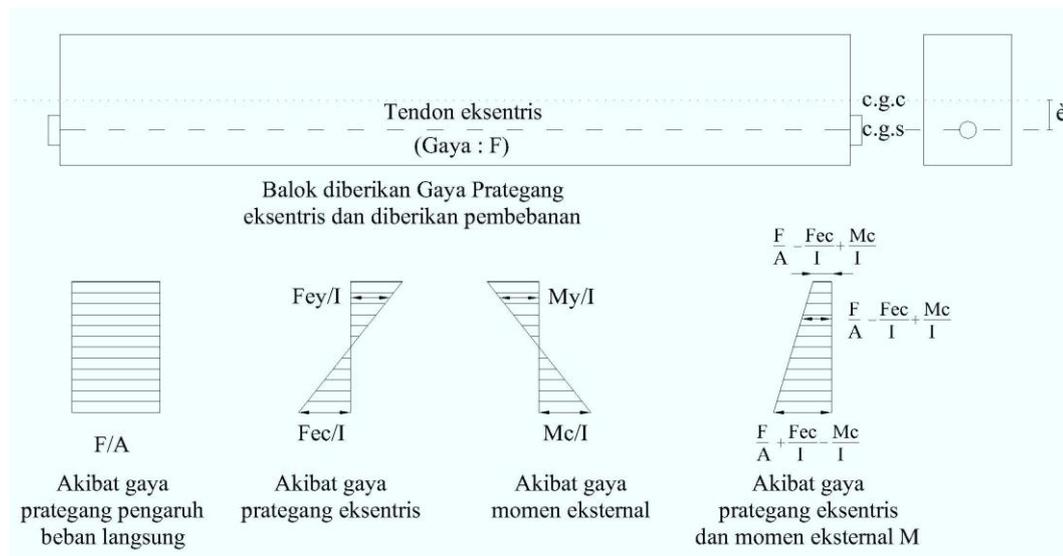
- a. Sistem Prategang untuk mengubah beton menjadi bahan yang elastis

Eugene Freyssinet memvisualisasikan beton prategang pada dasarnya adalah beton yang ditransformasikan dari bahan yang getas menjadi elastis dengan memberikan desakan pada bahan tersebut. Konsep ini melahirkan “tidak ada tekanan tarik” pada beton sehingga beton tidak retak.



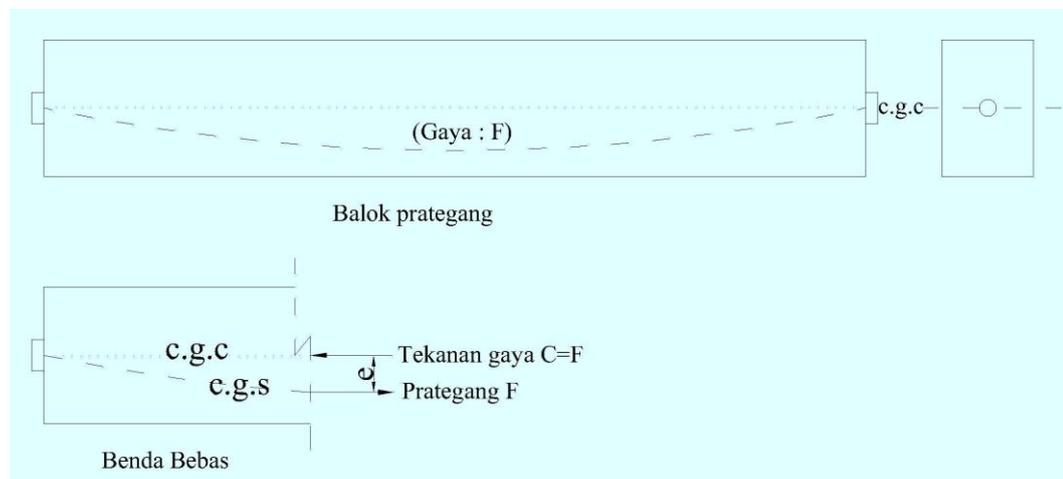
Gambar 2. Distribusi tegangan sepanjang penampang beton prategang konsentris

Penyelesaian menjadi sedikit rumit apabila tendon ditempatkan secara eksentris terhadap titik berat penampang beton. Akibat gaya prategang yang eksentris, beton dibebani oleh momen dan beban langsung.



Gambar 3. Distribusi tegangan sepanjang penampang beton prategang eksentris

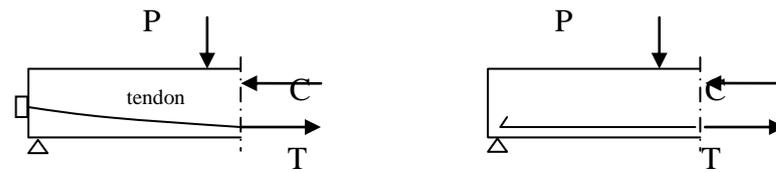
Bila tendon dilengkungkan, bagian kanan atau kiri dari batang sebagai benda bebas untuk menilai besarnya gaya pengaruh prategang. Keseimbangan gaya – gaya horisontal menunjukkan tekanan pada beton menyamai besarnya gaya prategang pada baja.



Gambar 4. Pengaruh gaya prategang

b. Sistem prategang untuk kombinasi baja mutu-tinggi dengan beton.

Konsep ini mempertimbangkan beton prategang sebagai kombinasi dari baja dan beton, seperti pada beton bertulang dimana baja menahan tarikan dan beton menahan tekan.



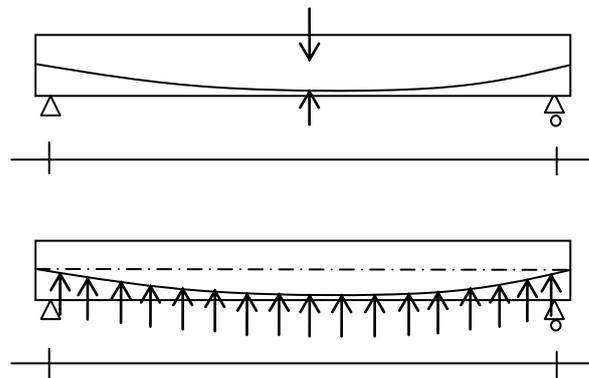
Bagian balok prategang

Bagian balok beton bertulang

Gambar 5. Momen penahan internal pada balok beton prategang dan beton bertulang

c. Sistem prategang untuk mencapai kesetimbangan beban

Konsep ini menggunakan prategang sebagai suatu usaha untuk membuat seimbang gaya-gaya pada suatu batang.



Gambar 6. Balok prategang dengan tendon parabola

5. Metode pemberian tegangan

a. Pretensioned Prestressed Concrete

Metode dengan cara tendon ditegangkan dengan pertolongan alat pembantu sebelum dicor atau sebelum beton mengeras dan gaya prategang dipertahankan sampai beton cukup keras. Gaya prategang akan ditransfer kebeton melalui panjang transmisi tertentu yang tergantung kondisi permukaan serta profil penampang baja, diameter dan kekuatan beton. Keuntungannya metode ini adalah daya lekat yang bagus dan kuat terjadi antara baja tegangan dan beton.

b. Pretensioned Postressed Concrete

Metode dengan cara mengecor beton terlebih dahulu dan dibiarkan mengeras sebelum diberi gaya tegangan. Baja dapat ditempatkan dalam posisi dudukan besi yang sesuai dengan koordinat yang telah ditentukan, lalu dicor dalam beton, lekatan dihindarkan dengan menyelubungi baja dengan membuat saluran untuk tempat kabel. Setelah kekuatan beton tercapai maka baja ditegangkan diujung – ujungnya dan dijangkar.

Metode ini dibagi menjadi 2 yaitu *Bonded tendons* dan *non-bonded tendons*.

B. Beton Serat

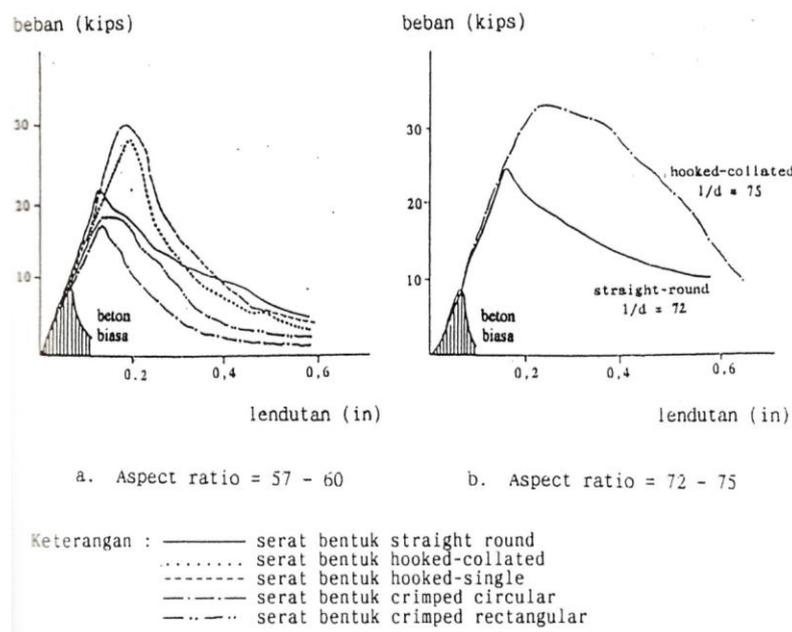
Beton serat merupakan campuran beton ditambah serat, umumnya berupa batang– batang dengan ukuran 5 – 500 μm (mikro meter), dan panjang sekitar 25 mm. Bahan serat dapat berupa serat asbes, serat tumbuh – tumbuhan (bambu, ijuk), serat plastik (*polypropylene*), atau potongan kawat baja. Kelemahannya sulit dikerjakan, namun lebih banyak kelebihanannya, antara lain kemungkinan terjadi segregasi kecil, daktil, dan tahan benturan (Mulyono, 2004). Maksud utama dari penambahan serat ini adalah untuk menambah kuat tarik beton. Pemberian serat tidak banyak menambah kuat tekan beton namun hanya menambah daktilitasnya saja (Tjokrodimulyo,1996).

Menurut ACI Committee 544, beton serat didefinisikan sebagai beton yang terbuat dari campuran semen, agregat kasar, agregat halus, serta sejumlah kecil serat. Penambahan serat dimaksudkan untuk memberi tulangan serat pada beton,

yang disebarakan secara acak untuk mencegah retak-retak yang terjadi akibat pembebanan.

Penambahan serat pada adukan beton memperbaiki sifat-sifat struktural beton. Serat membantu mengikat dan menyatukan campuran beton setelah terjadinya pengikatan awal dengan semen.

Mekanisme perkuatan serat adalah meliputi adanya transfer tegangan dari matrik ke serat melalui geser antar permukaan atau melalui ikatan yang terjadi dengan adanya permukaan serat yang diberi bentuk tertentu. Dengan adanya bentuk tertentu pada permukaan serat akan terjadi saling mengikat antara serat dan matrik. Sifat – sifat mekanika beton serat dipengaruhi oleh tipe/jenis serat, rasio panjang serat terhadap diameter serat (*aspect ratio*), ukuran, bentuk, jumlah total serat (prosentase serat terhadap volume beton), kekuatan matrik.



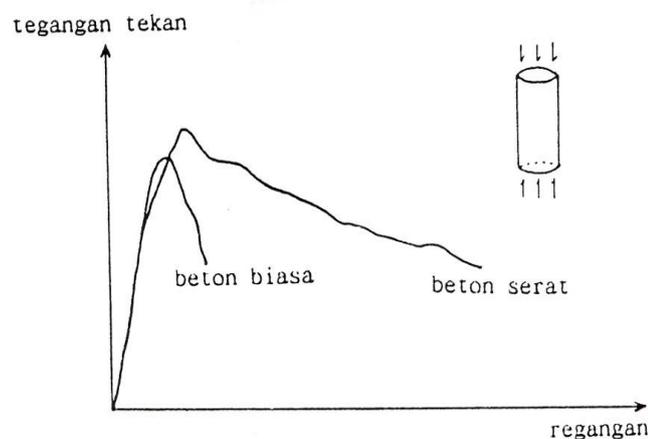
Gambar 7. Karakteristik beban lentur – lendutan beton serat baja dengan tipe serat yang berbeda (Soroushian & Bayasi, 1991)

Beberapa sifat dan perilaku beton yang dapat diperbaiki setelah penambahan serat antara lain :

1. Daktilitas

Penambahan serat ke dalam adukan beton dapat mengatasi masalah beton yang bersifat getas (*brittle*) menjadi lebih daktail. Energi yang diserap oleh beton serat untuk mencapai keruntuhan lebih besar dibandingkan dengan energy yang diserap oleh beton biasa, baik akibat beban tekan maupun akibat beban lentur.

Jumlah energi yang diserap oleh beton erat hubungannya dengan luas daerah di bawah kurva tegangan regangan seperti terlihat pada Gambar 8. Perbaikan sifat ini sangat menguntungkan untuk struktur beton bertulang tahan gempa dan struktur tahan ledakan karena dapat menyerap energi yang masuk melalui deformasi yang besar tanpa keruntuhan (Soroushian & Bayasi, 1987).

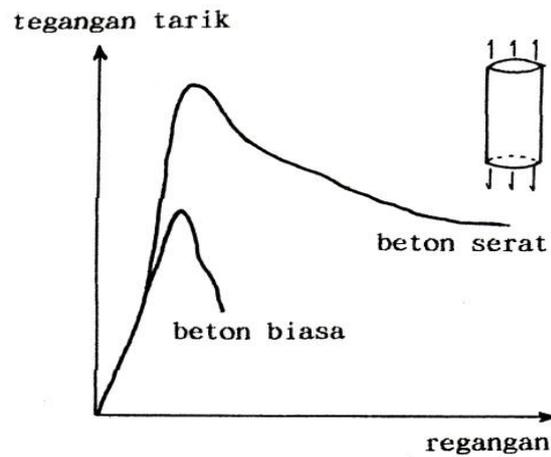


Gambar 8. Perbaikan daktilitas beton serat (Soroushian & Bayasi, 1987)

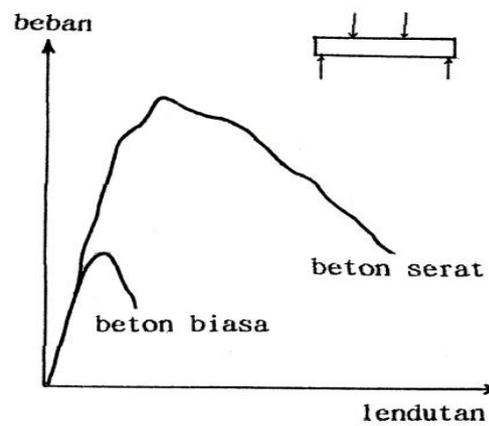
2. Kekuatan lentur dan tarik.

Sifat kuat tarik yang rendah pada beton dapat diperbaiki dengan penambahan serat ke dalam adukan. Gambar 9 dan 10 memperlihatkan

pengaruh serat pada beton dari pengujian tarik langsung dan pengujian lentur. Dari gambar tersebut terlihat bahwa dengan adanya serat dalam beton dapat memperbaiki daktilitas beton.



Gambar 9. Perbaikan Kuat Tarik Beton Serat (Soroushian & Bayasi, 1987)

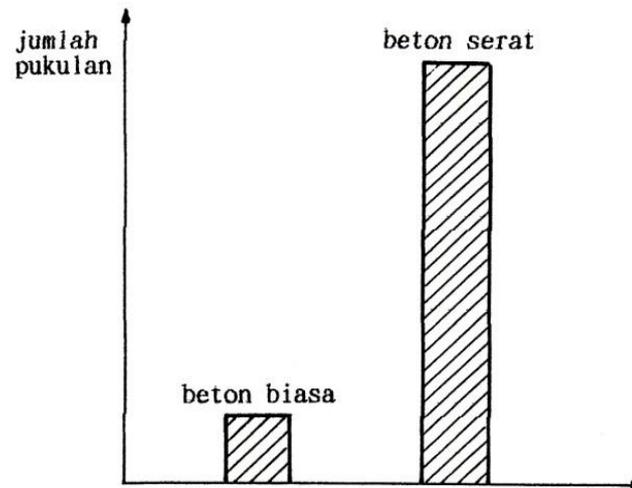


Gambar 10. Perbaikan Kuat Lentur Beton Serat (Soroushian & Bayasi, 1987)

3. Ketahanan kejut (*impact resistance*)

Penambahan serat ke dalam adukan beton dapat meningkatkan ketahanan kejut beton dengan sangat memuaskan. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 11, dimana ketahanan kejut pada beton biasa jauh lebih rendah bila di-

bandingkan dengan beton serat. Kemampuan menyerap energi sampai terjadi retak pada beton serat sangat besar. Peningkatan ketahanan kejut sangat menguntungkan untuk perkerasan lapangan terbang dan struktur pelindung (Soroushian & Bayasi, 1987)



Gambar 11. Perbaikan Ketahanan Kejut Beton Serat (Soroushian & Bayasi, 1987)

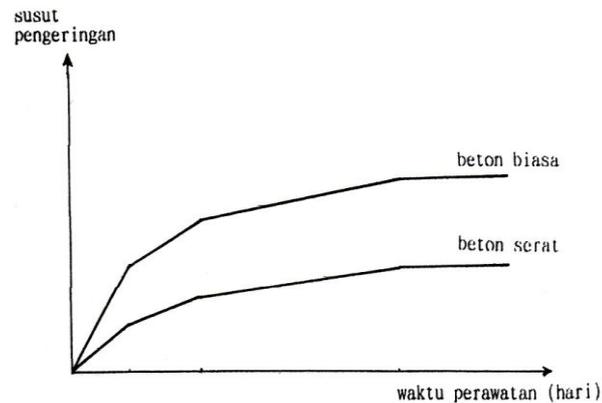
4. Ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue life*)

Penambahan volume fraksi serat pada adukan beton dapat meningkatkan ketahanan terhadap kelelahan, mengurangi lebar retak, dan lendutan yang terjadi akibat pembebanan kelelahan (*fatigue*). Perbaikan sifat ini mendorong pemakaian beton serat untuk aplikasi perkerasan dan jembatan. Penggunaan beton serat dapat mereduksi tebal perkerasan beton biasa sampai 50% (ACI Committee 544, 1982).

5. Penyusutan (shrinkage)

Keretakan pada beton dapat juga terjadi akibat penahanan terhadap penyusutan bebas yang disebabkan oleh kontinuitas struktur, baja tulangan

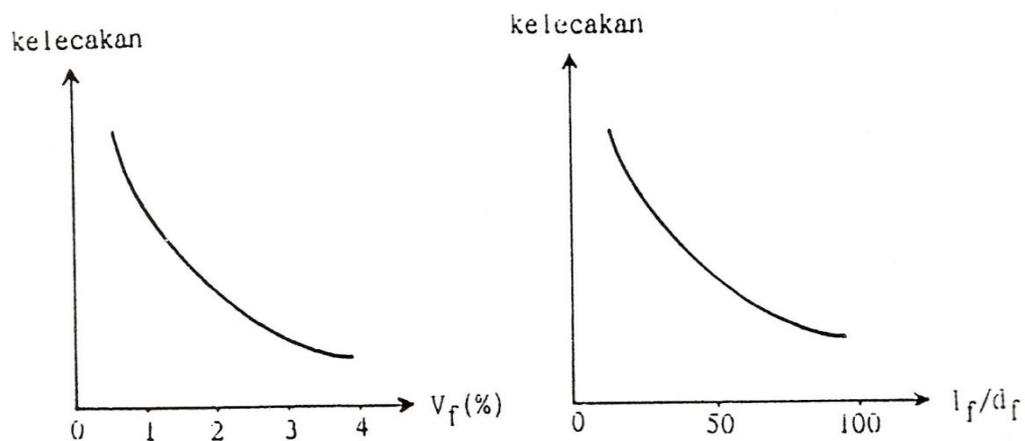
dan gradien kebasahan dalam beton. Dengan adanya serat dalam beton dapat mengurangi penyusutan dan membatasi retak-retak penyusutan, seperti yang terlihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Susut pengeringan beton serat dan beton biasa (Soroushian & Bayasi, 1987)

Beberapa hal yang harus diperhatikan pada beton serat baja yaitu:

- Terjadinya korosi pada serat jika tidak terlindung dengan baik oleh beton.
- Masalah *workability* yang menyangkut kemudahan dalam proses pengerjaan. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 13.



Pengukuran kelecakan adukan serat dengan pengujian slump akan

Gambar 13. Pengaruh volume fraksi serat (V_f) dan aspect ratio (l_f/d_f) serat terhadap kelecakan (Soroushian & Bayasi, 1987)

menghasilkan nilai slump yang rendah sehingga pengujian slump bukan merupakan ukuran kelecakan yang baik untuk beton serat. Nilai slump sebesar 2 cm pada adukan beton serat masih dapat dikerjakan. Alat ukur kelecakan lainnya yang lebih efektif digunakan untuk adukan beton serat adalah *Inverted Slump Cone Test Equipment* dan *VB-test Apparatus* yang prinsip kerjanya mengukur waktu yang diperlukan (dalam detik) untuk meluluhkan adukan beton dengan metode penggetaran. Kelecakan beton serat yang baik bila *VB-time* nya sebesar 5-25 detik (ACI Committee 544)

- c. Masalah *mix design* untuk memperoleh mutu tertentu dengan kelecakan yang memadai untuk itu perlu diteliti.
- d. Terjadinya *balling effect* yaitu serat menggumpal seperti bola dan tidak menyebar secara merata pada saat pencampuran sehingga perlu diusahakan cara penyebaran serat baja secara merata pada adukan.

C. Aplikasi Konsep beton serat

Sebagian besar aplikasi beton serat baja digunakan pada pelat (*slab*), *bridge deck*, perkerasan lapangan terbang perkerasan lapangan parkir, bantalan rel kereta api, gelagar pada jembatan, balok dan kolom struktur. Dalam aplikasi – aplikasi tersebut, pekerjaan beton serat dibagi menjadi dua kategori yaitu : *overlay* dan perkerasan baru.

Penggunaan beton serat untuk beberapa aplikasi pelat dan lantai seperti lantai gudang di Burnassum Project, Holland: proyek lantai untuk alat – alat berat (gudang) di Kidston Gold Mine, Australia dan sebagainya pada umumnya menunjukkan bahwa pemakaian beton serat untuk aplikasi tersebut memberikan lebih banyak keuntungan dari pada pemakaian beton biasa antara lain : dapat

mengurangi retak yang terjadi kecuali pada konstruksi sambungannya, dapat mengurangi tebal perkerasan, lebih ekonomis, dapat digunakan pada lantai dengan beban – beban yang berat dan memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap kerusakan yang diakibatkan roda alat berat. (*ACI Committee 544*, 1988).

Beton serat pada umumnya direncanakan terhadap kekuatan lentur statik selama umur konstruksi. Grafik – grafik perencanaan hanya mengambil perbaikan dalam ketahanan terhadap beton serat baja saja dan jarang diarahkan pada spesifikasi dan prosedur perencanaan juga factor penting yang lain seperti penyusutan (*shrinkage*) dan ketahanan terhadap beban kejut.

D. Serat (*Fiber*)

Berbagai macam serat telah diteliti sebagai bahan campuran adukan beton seperti serat baja, serat gelas, serat karbon, serat polimer, serat asbes dan serat dari bahan alami.

Bermacam-macam serat direkomendasikan sebagai perkuatan beton, *ACI Committee 544* mengklasifikasikan tipe serat secara umum menjadi empat yaitu:

1. *SRFC (Steel Fiber Reinforced Concrete)*.
2. *GFRC (Glass Fiber Reinforced Concrete)*.
3. *SNFRC (Synthetic Fiber Reinforced Concrete)*.
4. *NFRC (Natural Fiber Reinforced Concrete)*.

Tabel 2. Spesifikasi serat-serat yang sering digunakan.

<i>Fiber Types</i>	<i>Specific Gravity</i>	<i>Tensile Strength (Ksi)</i>	<i>Young's Modulus 10³ Ksi (%)</i>	<i>Elongation at Failure (%)</i>	<i>Common Diametres (inch)</i>	<i>Common Length (inch)</i>
1	2	3	4	5	6	7
<i>Steel</i>	7,86	100 – 300	30	Up to 30	0,0005 – 0,04	0,5 – 1,5
<i>Glass</i>	2,7	Up to 180	11	3,5	0,004 – 0,0,3	0,5 – 1,5
<i>Polypropylene</i>	0,91	Up to 100	0,14 – 1,2	2,5	Up to 0,1	0,5 – 1,5
<i>Carbon</i>	1,60	Up to 100	7,2	1,4	0,0004 – 0,0008	0,02 – 1,5

Sumber . Soroushian, 1987.

Serat Kaca memiliki kuat tarik yang relatif tinggi, kepadatan rendah dan modulus elastisitas tinggi. Kelemahan serat kaca adalah mudah rusak akibat alkali yang terkandung di dalam semen dan mempunyai harga beli yang lebih tinggi bila dibandingkan serat lainnya (Soroushian & Bayasi, 1987).

Serat Polimer telah diproduksi sebagai hasil dari penelitian dan pengembangan industri petrokimia dan tekstil. Serat polimer termasuk *aramid*, *acrylic*, *nylon* dan *polypropylene* mempunyai kekuatan tarik yang tinggi tetapi modulus elastisitas rendah, daya lekat dengan matrik semen yang rendah, mudah terbakar dan titik leleh nya rendah.

Serat karbon sebenarnya sangat potensial untuk memenuhi kebutuhan tarik yang tinggi dan kuat lentur yang tinggi. Serat karbon memiliki modulus elastisitas yang sama bahkan dua hingga tiga kali lebih kuat dari baja, sangat ringan dengan berat jenis 1,9. Namun penyebaran serat karbon dalam matrik semen lebih sulit bila dibandingkan dengan serat lainnya.

Serat natural atau NFRC (*Natural Fiber Reinforced Concrete*) masih sedikit dimanfaatkan, karena penelitian yang dilakukan masih jarang dan belum adanya publikasi. “Bambu” adalah salah satu serat alam yang baik digunakan.

E. Serat Bambu

Bambu merupakan tanaman ordo *Bambooidae* yang pertumbuhannya cepat dan dapat dipanen pada umur sekitar 3 tahun. Pada masa pertumbuhan bambu dapat tumbuh vertikal 5 cm perjam atau 120 cm perhari (Morisco, 1996) menyatakan, adanya serabut sklerenkin di dalam batang bambu yang menyebabkan bambu mempunyai kekuatan dan dapat digunakan untuk keperluan bahan bangunan. Kekuatan bambu umumnya dipengaruhi oleh jumlah serat sklerenkin dan selulosa didalam bambu. Kekuatan bambu di bagian luar jauh lebih tinggi dibandingkan bambu bagian dalam.

1. Anatomi Bambu

Sifat dari batang bambu ditentukan oleh struktur anatominya. Batang bambu terdiri atas nodia dan internodia. Pada internodia, sel-sel berorientasi pada arah aksial, sedangkan pada nodia sel-sel melintang pada tiap sambungannya. Bagian luar batang dibentuk oleh dua lapisan sel epidermis, bagian dalamnya lebih tebal dan sangat tinggi kadar lignin-nya. Permukaan sel yang paling luar dilindungi oleh lapisan selaput berupa lapisan lilin. Disamping itu, bagian dalam batang terdiri dari sel-sel sclerencyma. Perbedaan anatomi ini akan mempengaruhi kekuatan bambu sesuai dengan jenisnya masing-masing

Beberapa hal yang cukup penting berkaitan dengan sifat anatomi bambu antara lain adalah :

a. Panjang Serat

Dari pengujian yang dilakukan pada bambu berumur tiga tahun, diketahui bahwa panjang serat bervariasi antara 2,631-4,279 mm. Panjang serat minimum diperoleh dari bambu betung bagian ujung, panjang serat

maksimum diperoleh dari bambu Betung bagian pangkal. Sedangkan panjang rata-rata dari jenis spesies tersebut adalah 3,384 mm.

b. Kandungan Silika

Dari pengujian yang dilakukan pada bambu berumur tiga tahun, diketahui bahwa kandungan silika kisarannya cukup lebar. Kandungan silika ini sangat berpengaruh pada tingkat kekuatan bambu.

2. Sifat Fisika Bambu

Triwiyono dan Marisco (2000) juga melakukan pengukuran kadar air serta berat jenis bambu, khususnya bambu Betung.

Tabel 3. Kadar air dan berat jenis bambu Betung

Posisi	Nomor	Bambu Basah		Berat Kering Udara	
		Kadar air (%)	Berat Jenis	Kadar Air (%)	Berat Jenis
Pangkal	1	38,610	0,634	5,381	0,646
	2	34,256	0,680	4,390	0,663
	3	35,361	0,603	5,909	0,682
	Rata-rata	36,076	0,639	5,227	0,664
Tengah	1	41,129	0,695	6,250	0,711
	2	36,402	0,701	6,926	0,702
	3	35,965	0,712	6,859	0,769
	Rata-rata	37,832	0,703	6,678	0,727
Ujung	1	38,699	0,754	6,034	0,763
	2	36,078	0,712	8,756	0,697
	3	35,517	0,686	6,818	0,820
	Rata-rata	36,765	0,717	7,203	0,760

Sumber : Triwiyono dan Marisco,2000

3. Sifat Mekanika Bambu

Keragaman spesies dan habitat bambu berimplikasi pada perbedaan sifat penampangnya. Konsekuensinya, beberapa parameter yang mempengaruhi sifat mekaniknya perlu diidentifikasi dan diuji. Sifat mekanika bambu meliputi: kuat lentur (*bending*), kuat tekan (*compression*), kuat geser (*shear*), kuat tarik (*tension*), puntir (*torsion*), elastisitas (*elasticity*), pemuaian panas (*thermal expansion*) dan lain-lain.

Beberapa penelitian menurut para ahli tentang sifat mekanik bambu diantaranya

a) Penelitian Janssen

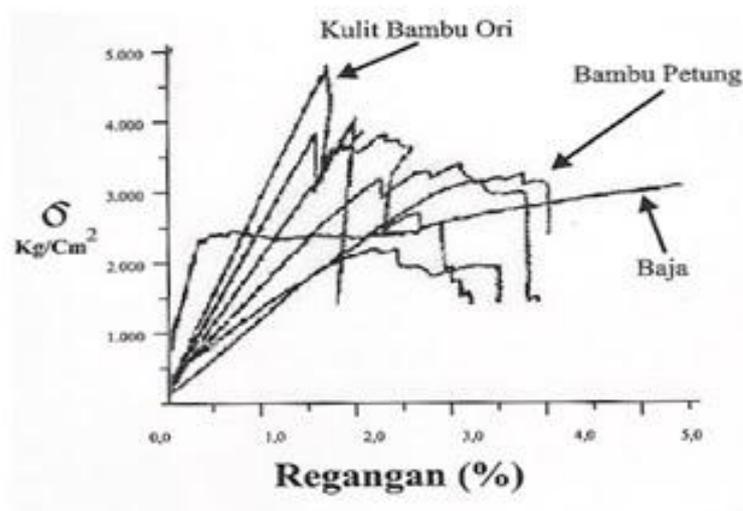
Janssen (1980) mulai melakukan penelitian sifat mekanik bambu pada tahun 1974, khususnya yang berkaitan dengan sambungan kuda-kuda untuk keperluan gedung sekolah dan bengkel. Penelitian ini dilakukan untuk memenuhi permintaan bantuan suatu Negara berkembang. Sebagai acuan awal untuk penelitian ini adalah berkas-berkas yang dibuat oleh kerajaan tentara Belanda tahun 1880-an.

Berbagai pengujian telah dilakukan oleh Janssen di Laboratorium untuk mengetahui kekuatan bambu terhadap tarik, tekan, lentur dan geser dengan pembebanan jangka panjang dan jangka pendek. Dalam penelitian ini dipakai bambu dengan spesies *Bambusa blumeana* berumur 3 tahun. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan bambu sangat dipengaruhi oleh kelembaban bahan. Lebih lanjut dilaporkan bahwa kekuatan lentur rata-rata adalah sebesar 84 MPa, modulus elastisitas sebesar 20.000 MPa. Kekuatan geser rata-rata cukup rendah yaitu 2,25 MPa.

b) Penelitian Morisco

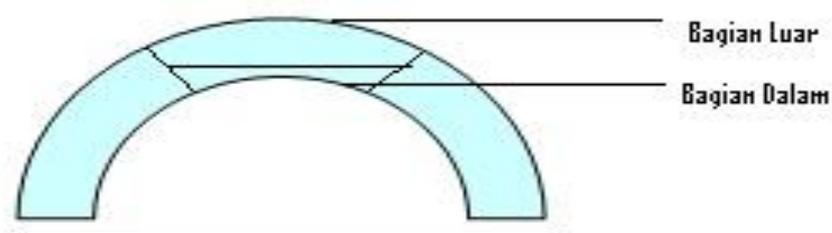
Penelitian tentang bambu juga dilakukan oleh Morisco pada tahun 1994 – 1999. Penelitian ini didorong oleh kenyataan bahwa kuat tarik bambu sangat tinggi, sedangkan dalam praktek kekuatan ini belum dimanfaatkan karena belum adanya metode penyambungan bambu yang dapat menghasilkan sambungan dengan kekuatan yang memadai. Penelitian dilakukan secara eksperimental, diawali dengan pengujian sifat mekanik bambu pada beberapa macam keadaan.

Untuk membandingkan kuat tarik bambu dan baja struktur, maka telah diuji kuat bambu ori dan bambu Betung. Spesimen bambu betung dibuat dari bahan sekitar kulit, sedangkan bambu Betung dibuat sampai bagian dalam (utuh). Semua specimen dibuat dari bagian bambu tanpa buku. Sebagai pembanding dipakai baja beton dengan tegangan leleh sebesar 240 MPa, yang mewakili baja beton yang terdapat dipasaran. Pengujian memakai universal testing machine merek United, dengan kapasitas 136 KN.



Gambar 14. Diagram tegangan regangan bambu

Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa kekuatan bambu betung cukup tinggi yaitu hampir mencapai 500 MPa atau 5000 Kg/cm², atau sekitar 2 kali tegangan leleh baja, sedangkan kuat tarik rata-rata bambu Petung/Betung juga lebih tinggi dari tegangan leleh baja. Hanya satu spesimen yang mempunyai kuat tarik lebih rendah dari tegangan leleh baja. Dalam penelitian ini juga dilakukan pengujian spesimen untuk mengetahui perbedaan kekuatan bambu dari bagian luar dan bagian dalam. Dalam pembuatan spesimen, bambu dibelah tangensial sehingga tebalnya kira-kira $\frac{1}{2}$ dari bambu utuh (seperti gambar di bawah ini). Bagian sisi yang ada kulitnya mewakili bambu bagian luar, sedangkan sisanya mewakili bambu bagian dalam. Masing-masing bagian dijadikan specimen untuk diuji kekuatannya. Dari tabel tampak bahwa bambu bagian luar mempunyai kekuatan jauh lebih tinggi daripada bambu bagian dalam. Kekuatan tinggi ini diperoleh dari kulit bambu yang terdiri dari unsur silika. Seperti pada Gambar 15.



Gambar 15. Pengambilan Spesimen Bambu

Mengingat struktur harus dirancang berdasarkan bagian yang lemah, maka pengujian sifat mekanika yang ditujukan untuk membedakan kuat tarik sejajar sumbu batang tanpa buku maupun dengan buku telah dilakukan.

Tampak pada Tabel 4 bahwa bambu tanpa buku lebih kuat daripada dengan buku.

Tabel 4. Kuat tarik bambu tanpa buku kering oven

Jenis Bambu	Kuat Tarik Bagian Dalam (MPa)	Kuat Tarik Bagian Luar (MPa)
Ori	164	417
Betung	97	285
Hitam	69	237
Tutul	146	286

Tabel 5. Kuat tarik rata-rata bambu kering oven

Jenis Bambu	Kuat Tarik Tanpa Buku (MPa)	Kuat Tarik dengan Buku (MPa)
Ori	291	128
Betung	190	116
Hitam	166	147
Legi	288	126
Tutul	216	74
Galah	253	124
Tali	151	55

4. Jenis Bambu

Dari 1500 jenis bambu di dunia, 170 (11%) diantaranya berasal dari Indonesia. Bisa dibayangkan banyaknya varietas bambu yang ada di negeri ini. Tak heran jika orang tua kita memakai bambu dalam kehidupan mereka sehari-hari, tak terkecuali sebagai bahan bangunan.

Untuk mendapatkan bambu yang kuat dan tahan lama, selain diperhatikan jenisnya, bambu pun harus dipilih yang sudah tua (3-5 tahun).

Sebelum dipakai bambu diawetkan terlebih dahulu agar tahan lama, baru kemudian dirangkai dengan teknik yang sesuai dengan karakteristik bambu. Dari 170 jenis bambu asli Indonesia, hanya ada tiga jenis bambu yang direkomendasikan untuk digunakan sebagai konstruksi bangunan, yaitu bambu ori, bambu betung dan bambu tali. Sedangkan beberapa jenis lainnya, seperti bambu hitam, dapat digunakan sebagai elemen pelengkap dan dekorasi.

a. Bambu Ori (*Dendrocalamus Asper*)

Merupakan bambu yang amat kuat dan tergolong besar dengan diameter 10-15 cm. Bambu Betung punya jarak ruas yang pendek dan dinding tebal serta bisa tumbuh sangat tinggi hingga 10-20 meter. Kuat tarik bambu ini sebesar 417 MPa (Subyakto, 2009). Bambu jenis ini biasanya digunakan sebagai struktur utama bangunan, yaitu kolom dan balok.



Gambar 16. Bambu Ori

b. Bambu Betung

Bambu ini memiliki diameter 10 cm dan berwarna hijau kekuningan. Bambu ini bisa tumbuh hingga mencapai 20 meter, panjang

ruas 40-60 cm, diameter 8-12 cm, dan tebal dinding sampai 20 mm. kuat tarik bambu petung mencapai 285 MPa.



Gambar 17. Bambu Betung

c. Bambu Tali

Bambu Tali merupakan bambu yang amat liat dengan diameter 6-8 cm dengan jarak antar ruas sampai dengan 65 cm. Panjang batang maksimal bambu Tali berkisar antara 6-13 meter. Bambu ini dapat digunakan sebagai gording pada konstruksi atap bambu. Kuat tarik bambu tali mencapai 151 MPa.



Gambar 18. Bambu tali

d. Bambu Hitam (*Gigantochloa Atroviolacea*)

Dinamakan juga bambu Wuluh. Bambu ini mempunyai panjang ruas yang sama dengan bambu Tali, hanya saja dindingnya tebal, hingga 2 cm. Bambu Hitam berdiameter antara 4-10 cm dengan panjang 7-18 meter.



Gambar 19. Bambu Hitam

5. Keunggulan Bambu

Rumah-rumah tradisional di Indonesia banyak yang menggunakan bambu sebagai bahan utamanya. Itu karena nenek moyang kita tahu bahwa selain mudah didapat dan murah, bambu juga merupakan material dengan banyak keunggulan. Yaitu diantaranya:

a. Kuat

Jika menggunakan jenis bambu yang tepat, bangunan dari bambu dapat bertahan sampai 50 tahun lebih. Ini bisa dilihat dari rumah-rumah tradisional yang masih dapat ditemui. Rumah-rumah tradisional tersebut menggunakan bambu-bambu terbaik dengan teknik pemasangan yang masih digunakan sampai saat ini.

Bambu yang sudah dewasa (berumur 3-5 tahun) mempunyai kekuatan tarik hingga 480 MPa. Ini lebih tinggi daripada kuat tarik baja yang hanya 370 MPa. Bambu juga mampu menahan gaya tarik sebesar 12.000 kg/m². Dengan kekuatan seperti ini kemampuan bambu tidak perlu diragukan lagi.

b. Lentur

Bambu merupakan bahan yang elastis sehingga dapat menjadi material untuk rumah tahan gempa. Tingkat kelenturannya tinggi, sebab bambu merupakan material yang ringan dan sistem rangkanya bekerja sebagai engsel. Semua batang dapat bekerja sedikit tanpa mempengaruhi kestabilan konstruksi. Kelenturan ini terdapat pada pasak, kuncian dan serta ikatan antar batang bambu. Bahan bangunan bambu serta strukturnya pun dapat berubah-ubah bentuknya. Fleksibilitas inilah yang membuat bangunan bambu dapat bergerak mengikuti guncangan gempa. Karena itu, sistem rangka bambu dapat diterapkan untuk rumah atau bangunan di daerah rawan gempa.

6. Kelemahan Bambu

Sebagai material alami, tentunya bambu memiliki beberapa kelemahan yang kadang mendatangkan kendala. Namun, para ahli tentunya sudah melakukan berbagai macam penelitian untuk mengatasinya. Berikut beberapa kelemahan bambu.

a. Tidak tahan air, terutama air hujan

Untuk bambu yang digunakan pada bidang eksterior, pakailah bambu jenis terbaik yang kering dan telah melalui proses pengawetan.

b. Sambungan sulit

Meskipun fungsinya hampir serupa dengan kayu, beberapa perbedaan agak mempersulit penggunaan bambu sebagai struktur bangunan. Salah satunya adalah bentuknya yang menyerupai pipa sehingga menjadi kendala dalam pembuatan sambungan antar bambu terutama pada sambungan.

c. Bentuknya kaku

d. Rawan bubuk

e. Mudah lapuk dan ditumbuhi jamur

F. Kehilangan Gaya Prategang

Besarnya gaya prategang sebenarnya yang ada dalam suatu balok beton prategang tidak dapat diukur dengan mudah. Gaya total pada tendon pada saat penarikan dapat ditentukan dengan *pressure gage* pada dongkrak. Berbagai macam kehilangan gaya prategang akan menurunkan gaya prategang menjadi harga yang lebih rendah, sehingga beban yang dipikul balok prategang menjadi lebih rendah pula. Selisih antara gaya prategang akhir dengan gaya prategang awal dinamakan “kehilangan prategang”. Jenis-jenis Kehilangan Prategang

1. Perpendekan elastis beton

Ketika gaya prategang disalurkan ke beton, maka beton akan menerima tekanan dan memendek sehingga terjadi pengenduran pada tendon. Regangan tekan pada beton akibat prategang harus sama dengan pengurangan regangan pada baja:

$$\varepsilon_c = \Delta \varepsilon_s$$

$$\frac{f_c}{E_c} = \frac{\Delta f_s}{E_s}$$

$$\Delta f_s = \frac{E_s f_c}{E_c} = n f_c$$

Keterangan:

f_c = tegangan pada beton setelah penyaluran tegangan dari tendon berlangsung.

Δf_s = tegangan tendon awal f_{si} dikurangi dengan tegangan tendon setelah penyaluran f_s

$$\Delta f_s = f_{si} - f_s = n f_c \dots\dots\dots(1)$$

Apabila P_o adalah gaya awal tendon dan P_f adalah gaya sesudahnya maka :

$$P_o - P_f = n \frac{P_f}{A_c} A_{ps}$$

$$P_o = n \frac{P_f}{A_c} A_{ps} + P_f$$

$$P_o = P_f \left(\frac{n A_{ps}}{A_c} + 1 \right) = \frac{P_f}{A_c} (n A_{ps} + A_c)$$

$$P_o = f_c (n A_{ps} + A_c)$$

$$f_c = \frac{P_o}{A_c + n A_{ps}} \text{ diperkirakan sama dengan } \frac{P_o}{A_g}$$

$$\text{Sehingga: } \Delta f_s = n f_c = \frac{n P_o}{A_g} \dots\dots\dots(2)$$

Untuk beban eksentris, $f_c = \frac{P_o}{A_g} \pm \frac{P_o \cdot e \cdot y}{I} \pm \frac{M \cdot y}{I}$

$$M_g = P_o \cdot e \cdot y = \text{momen gelagar}$$

Berhubung tegangan yang dihitung adalah tegangan pada pusat tendon maka nilai $y = e$

2. Rangkak dalam beton

Rangkak merupakan deformasi yang terjadi pada beton dalam keadaan tertekan akibat beban mati permanen. Kehilangan tegangan pada tendon akibat rangkak pada beton sebesar:

$$\Delta f_s = C_t n f_c \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan :

$C_t = 2$ untuk struktur pre tension

$C_t = 1,6$ untuk struktur post tension

f_c = tegangan pada beton yang melekat pada titik berat tendon akibat gaya prategang awal.

3. Susut dalam beton

Susut adalah perubahan volume dalam beton

$$\epsilon_{sh} = 8,2 \cdot 10^{-6} \left(1 - 0,06 \frac{V}{S}\right) (100 - RH) \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan :

V = volume beton (dalam inch)

S = luas permukaan beton

RH = kelembaban relatif udara

$$\Delta f_s = K_{sh} \varepsilon_{sh} E_s$$

K_{sh} = factor susut yang tergantung waktu

$K_{sh} = 1$ untuk prategang pretension

ε_{sh} = regangan susut dalam beton

Tabel 6. Nilai K_{sh} untuk komponen struktur post tension

Selisih waktu antara pengecoran dengan prategangan	1	3	5	7	10	20	30	60
K_{sh}	0,92	0,85	0,80	0,77	0,73	0,64	0,58	0,45

4. Relaksasi dari tegangan baja

Relaksasi diartikan sebagai kehilangan dari tegangan tendon secara perlahan seiring dengan waktu dan besarnya gaya prategang yang diberikan dibawah regangan yang hampir konstan

Basarnya kehilangan tegangan pada baja akibat relaksasi baja prategang dapat dihitung dengan rumus:

$$\Delta f_{re} = [K_{re} - J(\Delta f_{SH} + \Delta f_{cR} + \Delta f_{ES})]C \quad \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan :

Δf_{re} = kehilangan tegangan akibat relaksasi baja prategang

K_{re} = Koefisien relaksasi yang harganya berkisar 41- 138 MPa

J = Faktor waktu yang harganya berkisar antara 0,05-0,15

C = Faktor relaksasi yang besarnya tergantung pada jenis tendon

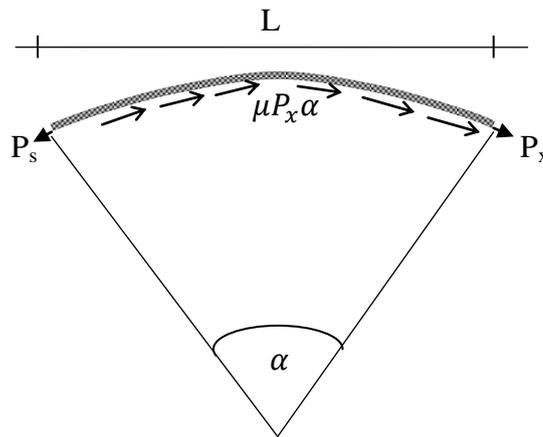
Δf_{SH} = Kehilangan tegangan akibat susut

Δf_{cR} = Kehilangan tegangan akibat rangkai

Δf_{ES} = Kehilangan tegangan akibat perpendekan elastic beton

5. Gesekan

Kehilangan ini terjadi akibat gesekan antara tendon dengan bahan sekitarnya (selubung tendon). Kehilangan ini langsung dapat diatasi dari penarikan tendon pada jack.



$$P_s = P_x e^{(\mu\alpha + KL)} \dots\dots\dots(6)$$

Keterangan :

K = koefisien panjang, sesuai dengan tipe tendon

P_x = Prategang awal

μ = koefisien gesek

5. Slip ankur

Slip ankur terjadi pada saat tendon dilepas setelah mengalami penarikan dan prategang dialihkan ke ankur. Tendon dapat tergelincir sedikit.

Besarnya slip sekitar 2,5 mm

$$\epsilon_s = \frac{\Delta a}{L}$$

$$\Delta f_s = \epsilon_s E_s$$

$$\Delta f_s = \frac{\Delta a}{L} E_s \dots\dots\dots(7)$$

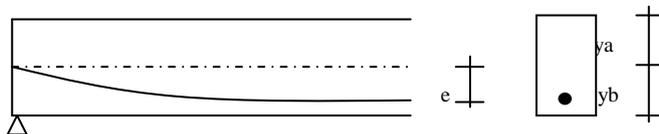
Tabel 7. Persentase rata-rata kehilangan prategang

No	Kehilangan Prategang	Pretension (%)	Post Tension (%)
1	Perpendekan elastis beton	4	1
2	Rangkak pada beton	6	5
3	Susut beton	7	6
4	Relaksasi baja	8	8
TOTAL		25	20

G. Tata Letak Tendon Prategang

Tegangan tarik pada serat beton yang terluar dari garis netral akibat beban layan tidak boleh melampaui nilai maksimum yang diizinkan oleh peraturan yang ada seperti pada SNI 2847 2002.

Pasal 20.4.2.3. Tegangan tarik serat terluar akibat beban layan $\leq \frac{1}{2} \sqrt{f'_c}$.



$$f_{c_a} = -\frac{P}{A_c} + \frac{P \cdot e \cdot y_a}{I}$$

Keterangan :

f_{c_a} = tegangan pada serat atas

e = eksentrisitas tendon prategang

A_c = luas penampang beton

I = momen inersia penampang beton

P = gaya prategang

$$r = \sqrt{\frac{I}{A_c}} \quad r = \text{jari-jari inersia}$$

$$I = r^2 \cdot A_c$$

$$f_{c_a} = -\frac{P}{A_c} + \frac{P \cdot e \cdot y_a}{I} = -\frac{P}{A_c} + \frac{P \cdot e \cdot y_a}{r^2 A_c} = \frac{P}{A_c} \left(-1 + \frac{e \cdot y_a}{r^2} \right) \dots\dots\dots(8)$$

Agar tidak terjadi tegangan tarik pada serat atas maka $f_{c_a} = 0$

$$\left(-1 + \frac{e \cdot y_a}{r^2} \right) = 0$$

$$r^2 = e \cdot y_a$$

$$e = \frac{r^2}{y_a}$$

Jadi agar tidak terjadi tegangan tarik pada serat atas maka batas bawah tendon prategang sebesar :

$$k_b = \frac{r^2}{y_a}$$

Tegangan pada serat beton paling bawah

$$f_{c_b} = -\frac{P}{A_c} - \frac{P \cdot e \cdot y_b}{I} = -\frac{P}{A_c} - \frac{P \cdot e \cdot y_b}{r^2 A_c} = \frac{P}{A_c} \left(-1 - \frac{e \cdot y_b}{r^2} \right) \dots\dots\dots(9)$$

Tegangan pada serat beton paling bawah = 0

$$\left(-1 - \frac{e \cdot y_b}{r^2} \right) = 0$$

$$-e = \frac{r^2}{y_b} \quad \text{tanda negatif e diatas garis netral}$$

Jadi agar tidak terjadi tegangan tarik pada serat bawah maka batas atas tendon prategang sebesar :

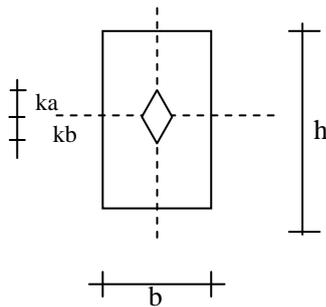
$$k_a = \frac{r^2}{y_b}$$

Untuk penampang persegi dengan tinggi h dan lebar b

$$r^2 = \frac{I}{A} = \frac{\frac{1}{12}bh^3}{b \cdot h} = \frac{1}{12} h^2$$

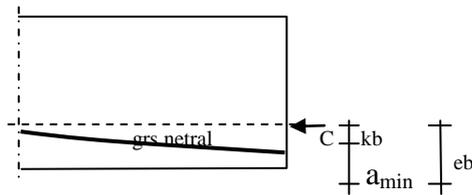
$$y_a = y_b = \frac{1}{2} h$$

$$\text{maka } k_a = k_b = \frac{\frac{1}{12} h^2}{\frac{1}{2} h} = \frac{1}{6} h \quad \dots\dots\dots(10)$$

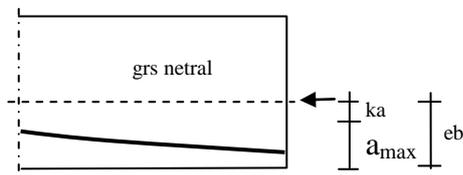


Apabila M_D adalah momen akibat beban mati dan M_T adalah momen akibat

beban mati dan beban hidup, maka $a_{min} = \frac{M_D}{P_i}$ terjadi pada saat transfer



$$e_b = a_{min} + k_b$$



$$e_b = a_{max} - k_a$$

Keterangan :

C = gaya tekan

H. Desain Penampang Prategang

Untuk desain pendahuluan, tinggi penampang beton prategang biasanya dapat dipakai pendekatan 70 % dari penampang beton bertulang biasa. Tinggi penampang beton prategang dapat juga dihitung dengan pendekatan :

$$h = k\sqrt{M} \dots\dots\dots(11)$$

Keterangan :

h = tinggi balok dalam inch

k = koefisien 1,5 – 2

M = momen lentur maksimum kip-ft

Desain Dengan Teori Elastik, penampang beton prategang ditentukan oleh :

1. Momen total yang menentukan terjadinya tegangan akibat beban kerja
2. Momen berat sendiri balok yang menentukan lokasi tendon (eksentrisitas) dan tegangan yang dialihkan.

Langkah-Langkah Desain: (perbandingan M_G/M_T kecil (< 20%))

1. Dari penampang disain pendahuluan, tentukan letak tendon (c.g.s)

$$e_b = a_{\min} + k_b$$

$a_{\min} = \frac{M_G}{F_o}$ dengan M_G adalah momem akibat berat sendiri; F_o merupakan gaya inisial

$$e_b - k_b = \frac{M_G}{F_o} \dots\dots\dots(12)$$

2. Dengan letak c.g.s seperti diatas, hitung gaya prategang efektif F

$$e_b = a_{\max} - k_a$$

$$a_{\max} = \frac{M_T}{F} \quad \text{dengan } M_T \text{ adalah momem total; } F \text{ merupakan gaya efektif}$$

$$e_b + k_a = \frac{M_T}{F}$$

$$F = \frac{M_T}{e_b + k_a} \quad \dots\dots\dots(13)$$

3. Hitung A_c yang diperlukan dengan

$$\frac{F_o}{A_c} : f_b = y_a : h$$

$$f_b = \frac{F_o h}{A_c y_a} \quad \text{dan}$$

$$f_a = \frac{F h}{A_c y_b} \quad \dots\dots\dots(14)$$

4. Cek tegangan serat atas dan bawah pada penampang beton.

Tegangan beton sesaat setelah penyaluran gaya prategang adalah:

$$f_b < 0,60 f'_c, \quad f_a < 0,25 \sqrt{f'_c} \quad \text{dan serat tarik pada ujung komponen } < 0,5 \sqrt{f'_c}$$

Tegangan beton pada kondisi beban layan adalah:

$$f_a < 0,45 f'_c, \quad f_b < 0,5 \sqrt{f'_c}, \quad \text{nilai tersebut diambil hanya sedikit dibawah}$$

$$\text{nilai modulus runtuh beton normal yaitu } f_y = 0,7 \sqrt{f'_c}.$$

5. Ganti penampang pendahuluan untuk memenuhi persyaratan. Ulangi langkah 1- 4 bila perlu.