

BAB II LANDASAN TEORI

2.1. Umum

Seiring dengan berkembangnya zaman, teknologi pun semakin meningkat pesat dan mengalami pembaharuan setiap hari. Hal ini membuat salah satu bahan konstruksi yaitu beton menjadi suatu pilihan yang diminati. Penggunaan konstruksi beton relatif lebih murah serta lebih mudah untuk diperoleh. Perlu diketahui bahwa beton normal kuat tekan pada umur 28 hari berkisar antara 17-35 MPa. Daripada baja dan kayu, banyak bangunan-bangunan lebih memilih menggunakan beton diantaranya karena memiliki beberapa kelebihan yaitu :

1. Harganya relatif murah karena menggunakan bahan-bahan dasar seperti pasir, semen, dan kerikil.
2. Memiliki daya tahan suhu yang tinggi.
3. Beton memiliki durabilitas yang tinggi terhadap gempa bumi, getaran, maupun beban angin.
4. Biaya pemeliharaan atau perawatan pada beton sangat rendah.
5. Beton segar dapat dengan mudah diangkat maupun dicetak dalam bentuk apapun dan ukuran seberapa apapun tergantung keinginan sehingga waktu pengerjaan tidak terbuang.

Namun demikian, kerusakan juga bisa terjadi pada beton yang diakibatkan oleh kesalahan manusia maupun pada kondisi lingkungan. Salah satu upaya yang bisa dilakukan untuk memperbaiki kerusakan pada beton tersebut adalah dengan *redesign* dimana hal tersebut sangatlah tidak ekonomis. Oleh karena itu, peneliti menemukan suatu cara perkuatan yaitu dengan metode *retrofitting* atau perbaikan beton dengan menggunakan perkuatan. Perkuatan ini dapat diaplikasikan ke beton yang masih dalam keadaan baik guna untuk menambah kekuatan beton maupun perkuatan akibat gempa

Perkuatan konstruksi beton untuk mempertahankan atau menambah kekuatan sebenarnya sudah sangat lama dikembangkan, sehingga saat ini banyak cara yang dapat dipakai untuk memperkuat struktur. Beberapa cara perkuatan yang umum digunakan antara lain :

1. Memberi selubung pada konstruksi beton atau disebut dengan jacketing menggunakan material *Fiber Reinforced Polymer (FRP)*
2. Menambah lapisan beton yang baru
3. Memperbesar dimensi pada konstruksi beton
4. Menambah jumlah tulangan dari luar atau dikenal dengan *externally reinforcement*

2.2. Beton

Beton merupakan bahan material pencampuran dari agregat-agregat halus dan kasar, yaitu pasir, batu, batu pecah (*split*), atau bahan semacam lainnya, dengan menambahkan secukupnya bahan perekat semen, dan air sebagai bahan pembantu guna keperluan reaksi kimia selama proses pengerasan dan perawatan beton berlangsung. Beton sendiri juga merupakan bahan material yang tahan terhadap tegangan tekan dan lemah terhadap tegangan tarik

2.2.1. Semen

Semen adalah suatu jenis bahan yang memiliki sifat adhesif (*adhesive*) dan kohesif (*cohesive*) yang memungkinkan melekatkan fragmen-fragmen mineral menjadi suatu massa yang padat. Semen terbuat dari bahan utama *limestone* yang mengandung kalsium oksida (CaO), dan lemoung yang mengandung silika dioksida (SiO_2) serta aluminium oksida (Al_2O_3). Semen ada beberapa jenis, yaitu:

Tabel 2. 1. Jenis-jenis portland semen (Mc. Cormack, 2004)

	Jenis penggunaan
I	Konstruksi biasa dimana sifat yang khusus tidak diperlukan.
II	Konstruksi biasa dimana diinginkan perlawanan terhadap sulfat atau panas dari hidrasi yang sedang.
III	Jika kekuatan permulaan yang tinggi diinginkan.
IV	Jika panas yang rendah dari hidrasi diinginkan.
V	Jika daya tahan yang tinggi terhadap sulfat diinginkan.

Sumber : SKBI.1.4.53.1.1989

2.2.2. Agregat

Agregat terbagi atas agregat kasar dan halus. Pada umumnya penggunaan

bahan agregat dalam campuran beton mencapai jumlah $\pm 70\% - 75\%$ dari seluruh volume massa padat beton. Untuk mencapai kuat beton yang baik perlu diperhatikan kepadatan dan kekerasan massanya, karena pada umumnya semakin padat dan keras massa agregat, maka akan semakin tinggi kekuatan dan daya tahan (*durability*) beton.

Pasir merupakan agregat halus yang mempunyai ukuran diameter 1 mm – 5 mm. Pasir yang digunakan sebagai bahan beton harus memenuhi syarat berikut :

1. Berbutir tajam dan keras.
2. Bersifat kekal, yaitu tidak mudah lapuk/hancur oleh perubahan cuaca, seperti terik matahari dan hujan.
3. Tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% dari berat keringnya, jika kandungan lumpur lebih dari 5%, maka pasir tersebut harus dicuci.
4. Tidak boleh digunakan pasir laut (kecuali dengan petunjuk staf ahli), karena pasir laut ini banyak mengandung garam yang dapat merusak beton/baja tulangan.

Kerikil merupakan agregat kasar yang mempunyai ukuran diameter 5 mm – 40mm. Sebagai pengganti kerikil dapat pula dipakai batu pecah (*split*). Kerikil atau batu pecah yang mempunyai ukuran diameter lebih dari 40 mm tidak baik untuk pembuatan beton. Kerikil atau batu pecah yang digunakan sebagai bahan beton harus memenuhi syarat berikut :

1. Bersifat padat dan keras, tidak berpori.
Harus bersih, tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1%. Jika kandungan lumpur lebih dari 1% maka kerikil/batu pecah harus dicuci terlebih dahulu

2.2.3. Campuran

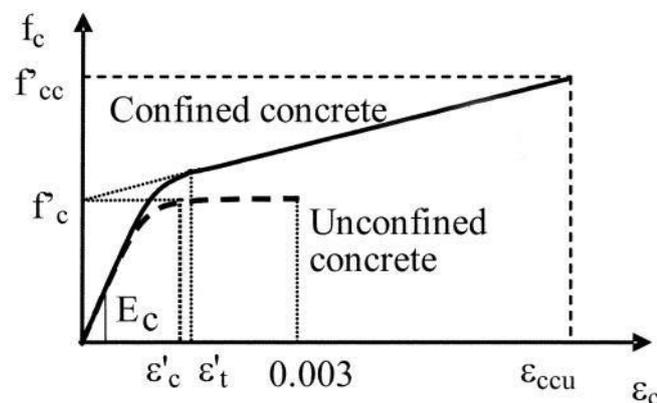
Selain semen, agregat halus, agregat kasar dan air, bahan-bahan lain yang dikenal sebagai campuran (*admixture*) dapat ditambahkan ke campuran beton segera sebelum atau ketika sedang mencampur. Campuran dapat merubah sifat dari beton agar dapat berfungsi lebih baik atau agar lebih ekonomis. Beberapa kegunaan penting dari campuran adalah sebagai berikut :

1. Meningkatkan daya tahan terhadap mutu beton.

2. Meningkatkan kelayakan tanpa menambahkan kadar air atau untuk mengurangikadar air dengan kelayakan yang sama.
3. Untuk mempercepat perkembangan kekuatan pada usia dini.
4. Memperlambat kenaikan suhu.
5. Meningkatkan kekuatan

2.3. Hubungan Tegangan dan Regangan dengan FRP

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Lam and Teng, disimpulkan hubungan antara tegangan dengan regangan sebagai berikut:



Gambar 2. 1. Hubungan Grafik Tegangan dan Regangan

Sumber : Lang and Teng *stress strain model for FRP-confined concrete circular columns FRP Strengthened RC Structures*, Teng et al. 2002

Pada grafik Lam and Teng, E_c merupakan *modulus elastik* dari beton tidak terkekang. Dimana kemiringan dari beton terkekang dan tidak terkekang pada bagian awal grafik sama. ϵ'_c merupakan regangan maksimum pada beton tidak terkekang pada kuat tekan f'_c , boleh diasumsi kan nilai 0.002 (ACI 440.2R-08). Setelah regangan melewati batas 0.002 maka akan terjadi penambahan regangan tanpa adanya gaya tegangan f_c sampai batas 0.003 sebelum terjadi kegagalan pada beton tidak terkekang. ϵ'_t tegangan transisi saat tegangan kekang dari saat FRP mulai berpengaruh kepada grafik regangan sebelum akhirnya mencapai regangan aksial ultimate (ϵ_{ccu})

Didapatkan bahwa pada grafik tersebut beton dengan perkuatan mengalami keruntuhan pada regangan aksial ultimate (ϵ_{ccu}) dan tegangan aksial ultimate (f''_{cc}). Lam dan Teng's (2003) mendesain grafik tersebut dengan beberapa asumsi yaitu:

1. Kemiringan parabola pada saat tidak ada regangan aksial pada bagian awal grafik sama dengan modulus elastisitas dari beton yang tidak terkekang
2. Grafik tegangan-regangan tersebut terdiri dari bagian pertama parabola dan bagian kedua linier
3. Bagian tidak linear pada awal grafik dipengaruhi sedikit oleh selimut FRP
4. Tidak ada perubahan kemiringan pada saat garis parabola dan garis linear bersinggungan
5. Bagian kedua garis linear terhenti pada saat tegangan dan regangan aksial pada beton terkekang tercapai

Berdasarkan SNI 03-2847-2002 Pasal 8.5.1 nilai modulus elastisitas untuk beton normal dengan berat isi antara 2200 kg/m³ hingga 2500 kg/m³ dapat digunakan nilai :

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (2.1)$$

E_c = Modulus elastisitas beton tekan (MPa)

w_c = Berat isi beton (kg/m³)

f'_c = Kuat tekan beton (MPa)

2.4. Metode Perkuatan Struktur

Akibat berkembangnya teknologi pada bidang konstruksi secara signifikan, hal ini membuat para peneliti menemukan penemuan baru untuk mengganti cara-cara manual (*konvensional*) yaitu dengan cara menggabung bahan aditif maupun dengan perkuatan eksternal.

Perkuatan pada struktur biasa juga perlu dilakukan karena adanya :

1. Perubahan fungsi suatu bangunan
2. Bertambahnya nilai keamanan pada suatu bangunan (*safety requirement*)
3. Terjadinya kerusakan yang tidak akibat bencana alam dll
4. Desain yang kurang baik
5. Konstruksi yang kurang baik
6. Korosi pada tulangan
7. Material yang kurang baik
8. Faktor lingkungan

Beton tidak dapat menahan gaya tarik melebihi nilai tertentu tanpa mengalami retak-retak. Untuk beton agar dapat bekerja dengan baik dalam suatu sistem struktur, perlu dibantu dengan memberikan perkuatan penulangan yang terutama akan mengemban tugas menahan gaya tarik yang bakal timbul di dalam sistem.

Pada umumnya metoda yang dapat digunakan dalam perkuatan kolom berguna untuk meningkatkan kapasitas lentur atau menambah *daktilitas*. Kapasitas lentur pada kolom dapat meningkat apabila perkuatannya menggunakan beton atau bungkus pelat baja. Bertambahnya daktilitas akan meningkatkan kuat geser sehingga dapat mengantisipasi kelemahan tarik pada beton.

Berbagai metode yang umum dilakukan dalam usaha perkuatan kolom antara lain:

1. Memperpendek maupun mempertinggi struktur dengan konstruksi beton.
2. Memperbesar dimensi pada konstruksi beton
3. Penggantian struktur dengan eksisting baru.
4. Menambah jumlah tulangan pada kolom dan memperbesar dimensi kolom beton (*Externally reinforcement*)

Dengan memberikan penyelubungan luar pada struktur. Biasanya bahan yang digunakan adalah FRP (*Fiber Reinforced Polymer*)

2.4.1. Steel Jacketing / Steel Plate Bonding

Metoda *steel jacketing* dilakukan dengan menambahkan plat baja pada pelapisan konstruksi beton, penambahan ini berupaya untuk menambah kapasitas geser sehingga dapat mengantisipasi keruntuhan karena kesalahan pada perencanaan. Dengan peningkatan kapasitas geser pada kolom tersebut maka akan meningkatkan kemampuan struktur dalam melakukan deformasi

2.4.2. Reinforced Concrete Jacketing

Concrete Jacketing merupakan salah satu teknik yang paling sering digunakan untuk memperbaiki & memperkuat struktur beton bertulang yang mengalami non kerusakan dan kerusakan. Konsep dasar metode ini adalah pembesaran dimensi dan penambahan tulangan pada elemen struktur tersebut untuk meningkatkan kinerja elemen tersebut. Pembesaran tersebut dilakukan

dengan *jacketing*. *Jacketing* dari bahan beton telah terbukti sebagai sebuah solusi perkuatan yang efektif untuk meningkatkan kinerja seismik kolom

Metode ini memiliki kelebihan dan kekurangan, adapun sebagai berikut:

a. Kelebihan :

- Mampu meningkatkan daktilitas struktur dan kekuatan struktur (kapasitas aksial, kapasitas lentur, dan kemampuan geser)
- Mampu menambah kekuatan struktur
- Mampu meningkatkan stabilitas struktur

Biaya lebih ekonomis dibandingkan metode perkuatan lainnya

b. Kekurangan :

- Ukuran kolom yang dipasang perkuatan akan menjadi lebih besar
- Jika penempatan *concrete jacketing* ini tidak diperhatikan dengan baik maka dapat menyebabkan penyebaran kekakuan yang tidak merata
- Kemampuan kapasitas dari *concrete jacketing* lebih rendah dibandingkan perkuatan dengan *steel jacketing*, GFRP, CFRP, AFRP.

Pada pelaksanaannya, sering menggunakan bahan beton encer/cair. Diberikan tambahan *additive bonding* pada selimut beton kolom yang dikelupas dengan tujuan memberikan daya lekat antara beton lama dengan beton baru. Ketika adanya pelapisan pada beton lama dengan beton baru, maka penyusutan akan tertahan. Hal ini akan membuat terjadinya tegangan tarik pada beton baru.

2.4.3. Metode Perkuatan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*)

Metode ini merupakan metode penambahan lapisan serat/*fiber* di luar lapisan beton guna untuk memperbesar kapasitas aksial yang dapat dipikul oleh beton. Diperlukan *Epoxy* sebagai perekat dan fiber untuk melaksanakan perkuatan dengan metode FRP

Perkuatan kolom dengan menggunakan metode FRP memberikan kemudahan dari banyak aspek serta dapat menggantikan metoda perkuatan yang telah ada. Perkuatan kolom dengan metoda ini akan meningkatkan kekuatan geser dan kuat tekan sebagai akibat dari kekangan dari material *fiber*. Metoda perkuatan ini sering diaplikasikan dalam hal perkuatan seismik pada jembatan

dan juga dalam renovasi bangunan.

Pelaksanaan metoda ini pada dasarnya adalah dengan memasang lembaran fiber pada permukaan beton.

Keuntungan menggunakan FRP sebagai bahan perkuatan kolom dibandingkan perkuatan lainnya antara lain:

1. FRP memiliki berat yang ringan dibandingkan dengan baja dan beton serta memiliki kekuatan yang tinggi
2. FRP lebih mudah dan cepat dikerjakan dan dipasang di lapangan
3. FRP cukup dilekatkan pada beton dengan menggunakan epoxy resin-nya sehingga tidak menghasilkan kebisingan.
4. FRP dapat dipasang pada kolom yang sangat panjang.
5. Tahan terhadap korosi dan lingkungan yang *reaktif*.
6. Tingkat *durabilitas* yang lebih tinggi dibandingkan material perkuatan lainnya.
7. Tidak terlalu mengubah struktural kolom *existing*, terutama ukuran jika dibandingkan dengan *steel* dan *concrete jacketing*.

Walaupun memiliki banyak keuntungan tetapi metode perkuatan FRP juga memiliki beberapa kerugian antara lain resiko terhadap bahaya kebakaran yang cukup tinggi, sehingga FRP perlu dilindungi oleh lapisan plasteran beton dan harga FRP yang relatif tinggi.

FRP terdiri dari beberapa jenis seperti bar, wrap, dan strip. Jenis bar digunakan untuk menggantikan tulangan pada struktur baru. Jenis strip digunakan pada balok, kolom, dan pelat. Sementara wrap paling banyak digunakan pada struktur kolom.

Pengembangan material komposit Fiber Reinforced Polymer (FRP) telah membuka peluang baru untuk keperluan perbaikan dan perkuatan struktur beton bertulang. Ada 3 jenis FRP yang dibedakan berdasarkan serat penyusunnya, yaitu *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (serat karbon), *Glass Fiber Reinforced Polymer* (serat gelas), dan *Aramid Fiber Reinforced Polymer* (serat aramid). Dalam penelitian ini digunakan FRP dari serat gelas (GFRP tipe *E- Glass*) yang dipakai sebagai perkuatan pengujian.

2.5. Serat (*Fiber*)

Secara spesifik, material *fiber* yang diaplikasikan untuk perkuatan dan perbaikan beton bertulang dapat berupa serat kaca, karbon, dan aramid. Masing-masing mempunyai kemiripan antara yang satu dengan yang lainnya. Nilai karakteristik masing-masing fiber diberikan pada Tabel dibawah nilai elastisitasnya bersifat linear untuk semua jenis serat, tetapi nilai lelehnya tidak signifikan

Tabel 2. 2 Tabel Nilai Elastisitas Serat (*Fiber*)

<i>Fiber</i>	<i>Tensile strength (N/mm²)</i>	<i>Modulus of Elasticity (kN/mm)</i>	<i>Elongation (%)</i>	<i>Specific Density</i>
<i>Carbon High Strength</i>	4300-4900	230-240	1,9 – 2,1	1,8
<i>Carbon High Module</i>	2740-5490	294-329	0,7-1,9	1,78-1,81
<i>Carbon Ultra High Module</i>	2600-4020	510-610	0,4-0,8	1,91-2,12
<i>Aramid</i>	3200-3600	424-430	2,4	1,44
<i>Glass</i>	2400-3500	70-85	3,5-4,7	2,6

Sumber : Simonelli, 2005

Pemilihan jenis *fiber* untuk perkuatan ataupun perbaikan suatu struktur tergantung pada beberapa faktor, seperti: tipe struktur, biaya yang tersedia, beban yang direncanakan, kondisi lingkungan, dan lain-lain.

2.5.1. *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)*

Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) merupakan jenis FRP yang menggunakan bahan dari serat kaca. *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* terbuat dari kaca cair yang dipanaskan pada suhu sekitar 2300°F dan dipintal dengan bantuan *bushing Platinumrhodium* pada kecepatan 200 mph.



Gambar 2. 2. *Fiber Glass*

(Sumber : images.google.com)

Material ini memiliki cukup banyak keuntungan yang dapat diberikan, antarlain merupakan material yang tahan korosi, mempunyai kuat tarik tinggi, superior dalam daktilitas, lebih ringan sehingga tidak memerlukan alat berat untuk dibawa ke lokasi, dan lebih murah dibanding FRP dengan bahan lain.

Beberapa jenis serat kaca yang tersedia di pasaran, antara lain:

1. *E-Glass*, yang memiliki kandungan alkali yang lebih rendah dan merupakan jenis yang paling banyak digunakan. Keuntungannya yaitu memiliki sifat mekanis yang tinggi.
2. *Z-Glass*, digunakan untuk mortar semen dan beton karena memiliki resistensi yang tinggi terhadap alkali.
3. *A-Glass* yang memiliki kandungan alkali tinggi.
4. *C-Glass*, yang digunakan untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan korosi yang besar untuk asam.
5. *S-Glass* atau *R-Glass*, yang diproduksi untuk ekstra kekuatan dan modulus yang tinggi.

Sebagai material untuk perkuatan eksternal, GFRP bentuk lembaran dapat digunakan untuk:

1. Perbaiki balok dan *slab* beton yang rusak, dengan asumsi bahwa debonding antara FRP dan beton tidak menyebabkan kegagalan elemen struktur.

2. Mengatasi penambahan lebar retakan akibat bertambahnya beban layan.
3. Melindungi tulangan dari korosi karena adanya retakan.
4. Meningkatkan kekuatan lentur akibat peningkatan beban.
5. Merencanakan beton baru yang memiliki daktilitas tinggi.
6. Perbaiki struktur akibat kesalahan desain atau konstruksi.
7. Meningkatkan kemampuan geser beton.
8. Meningkatkan kekuatan pengeangan kolom beton.
9. Perbaiki struktur lama

2.6. Aplikasi GFRP Pada Kolom Bangunan

Penggunaan FRP telah banyak digunakan pada bangunan-bangunan seperti jembatan, gedung-gedung, dll. Karena bahannya yang kuat, sederhana dan tidak mencemari lingkungan maka bahan ini banyak dipakai.

GFRP dipasang sebagai wrap pada kolom hingga seluruh permukaannya terlapsi. Bahan tersebut merupakan perpaduan antara *fiber* dengan *resin*.

GFRP tersebut sangat baik digunakan pada kolom berbentuk bulat dibandingkan dengan kolom yang berbentuk bujur sangkar dengan luas penampang yang sama. Selain bentuknya yang tidak perlu dibentuk dengan sudut-sudut tertentu pada kolom bulat, material ini juga akan lebih kuat dan terisi penuh pada kolom bulat.

2.6.2. Pemasangan GFRP pada kolom

Sebelum dilakukan pemasangan GFRP pada kolom, perlu dilakukan koreksi terhadap kolom sehingga pada waktu pemasangan akan menjamin keselamatan dan kenyamanan. Pemasangan GFRP pada kolom dilakukan dengan 2 tahap yaitu pekerjaan pada GFRP terlebih dahulu, Kemudian pemasangan GFRP pada kolom.

2.7. Persamaan Kuat Tarik, Regangan, dan Modulus Elastis Beton

2.7.1. Perhitungan Kuat Tekan Beton

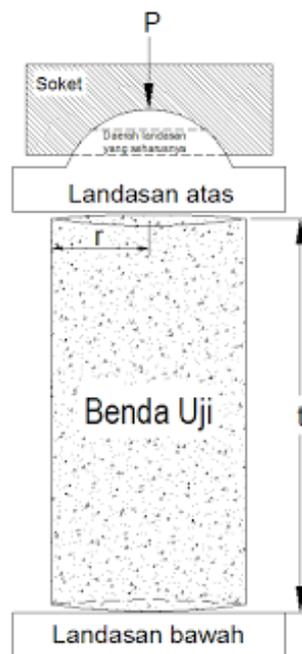
Pengertian kuat tekan beton adalah kemampuan dari beton untuk menerima gaya tekan persatuan luas. Kuat tekan beton adalah salah satu kinerja utama dari beton maka sifat ini menjadi sifat yang terpenting didalam kualitas beton dibanding

dengan sifat-sifat lain. Sebelum dilakukuan pengujian kuat tekan, benda uji ditimbang terlebih dahulu beratnya.

Berikut ini adalah rumus yang digunakan untuk menghitung kuat tekan beton :

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (2.2)$$

Dimana : f_c' = Kuat tekan beton (MPa)
 P = Gaya tekan aksial (N)
 A = Luas penampang melintang benda uji (mm^2)



Gambar 2. 3. Gambar Uji Kuat Tekan

Sumber : SNI 1974:2011

Pengujian kuat tekan beton dapat menggunakan beberapa macam bentuk benda uji. Setiap bentuk benda uji memiliki faktor bentuk yang berbeda. Berikut adalah nilai perbandingan kuat tekan beton atau faktor bentuk pada berbagai bentuk benda uji

Tabel 2. 3 Tabel Perbandingan Kuat Tekan

Benda Uji	Perbandingan Kuat Tekan
Kubus 15 x 15 x 15 cm	1,00
Kubus 20 x 20 x 20 cm	0,95
Silinder 15 x 30 cm	0,83

(Sumber : Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971)

Bertambahnya umur beton akan meningkatkan kuat tekan beton tersebut (umur dihitung sejak beton dicetak). Laju kenaikan kuat tekan beton awalnya cepat, semakin lama laju kenaikan tersebut akan semakin lambat. Setelah beton berumur 28 hari laju kenaikan kuat tekannya menjadi sangat kecil dan secara umum dianggap tidak naik lagi, sehingga sebagai standar kuat tekan beton ialah kuat tekan beton pada umur 28 hari. Berikut adalah perbandingan kuat tekan beton pada berbagai umur (PBI 1971) :

Tabel 2. 4 Perbandingan Kuat Tekan Berdasarkan Umur

Umur Beton (hari)	3	7	14	21	28	365
Semen Portland Biasa	0,40	0,65	0,88	0,95	1	1,35
Semen Portland dengan kekuatan awal yang tinggi	0,55	0,75	0,90	0,95	1	1,2

2.7.2. Perhitungan Kuat Lentur Beton

Kekuatan lentur adalah kemampuan balok beton yang diletakkan pada dua perletakkan untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji, yang diberikan padanya sampai benda uji patah dan dinyatakan dalam Mega Pascal (MPa) gaya tiap satuan luas. Pengujian ini dilakukan dua cara, sebagai berikut:

Center point loading bending test Pengujian ini dibebani dengan beban satu titik yang berdasarkan SNI 4154-2014 yang identik mengadopsi dari ASTM C293/C293M-10 *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete*.

Kuat lentur dihitung menggunakan persamaan SNI 03-4154-1996 berikut :

Keterangan :

$$f_{lt} = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2.3)$$

f_{lt} = kuat lentur, dalam MPa;

P = beban maksimum yang mengakibatkan keruntuhan balok uji, dalam Newton;

L = panjang bentang di antara kedua blok tumpuan, dalam mm;

b = lebar balok rata-rata pada penampang runtuh, dalam mm;

d = tinggi balok rata-rata pada penampang runtuh, dalam mm.

2.7.3. Modulus Elastis

Modulus elastis beton adalah kemiringan kurva tegangan regangan beton pada kondisi linier atau mendekati linier. Untuk beton normal dapat digunakan nilai (SNI 03-2847-2002 Pasal 8.5.1) :

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (2.4)$$

Keterangan,

f'_c = kuat tekan beton (MPa)

2.7.4. Regangan

Untuk mendapatkan regangan beton digunakan rumus hukum Hooke berikut:

$$E_c = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \text{ Maka } \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2.5)$$

Keterangan,

ε = regangan beton

E = modulus elastisitas beton (MPa)

σ = kuat tekan beton (MPa)