

## BAB II

### KAJIAN PUSTAKA

#### 2.1 Beton

Beton didapat dari pencampuran bahan-bahan agregat halus dan agregat kasar yaitu pasir, batu, batu pecah atau bahan semacam lainnya dengan menambahkan bahan perekat seperti semen, dan air sebagai bahan pembantu guna keperluan reaksi kimia selama proses pengerasan dan perawatan berlangsung (Istimawan Dipohusodo, 1999).

Susunan beton secara umum yaitu: 7-15 % semen, 16-21 % air, 25-30 % pasir dan 31-50 % kerikil. Kekuatan beton terletak pada perbandingan jumlah semen dan air, rasio perbandingan air terhadap semen (*W/C ratio*) yang semakin kecil akan menambah kekuatan (*compressive strength*) beton. Kekuatan beton ditentukan oleh oleh perbandingan air semen, selama campuran cukup plastis, dapat dikerjakan dan beton itu dipadatkan sempurna dengan agregat yang baik (Nugraha, P., 2007).

Dalam dunia konstruksi penggunaan beton sebagai bahan utama karena memiliki kelebihan dan kekurangan. Berikut ini adalah kelebihan yang dimiliki beton, antara lain:

- Harganya lebih murah karena material pembentuknya mudah diperoleh;
- Mudah diangkat dan dicetak sesuai dengan dimensi konstruksi yang akan dibuat;
- Memiliki kekuatan tekan yang tinggi;
- Tahan terhadap pembusukan maupun perkaratan;
- Beton tahan aus dan kebakaran;
- Beton segar dapat dipompa ke tempat-tempat yang tinggi dan sulit;
- Beton segar dapat ditempelkan pada beton lama yang retak.

Sedang kekurangan yang dimiliki oleh beton adalah sebagai berikut:

- Kuat tariknya sangat rendah yaitu 9-15 % dari kuat tekannya;
- Volume beton tidak stabil seiring proses pengerasannya;
- Beton segar mengerut saat pengeringan dan beton keras mengembang saat basah;

- Jika terjadi perubahan suhu, beton dapat mengembang dan menyusut;
- Tanpa tulangan bersifat getas dan merupakan material yang mudah retak.

Parameter-parameter yang paling mempengaruhi kekuatan beton adalah kualitas semen, proporsi semen terhadap campuran, kekuatan dan kebersihan agregat, interaksi atau adhesi antara pasta semen dengan agregat, pencampuran yang cukup dari bahan-bahan pembentuk beton, penempatan yang benar, penyelesaian dan pemadatan beton, dan perawatan beton (Nawi, 1985 dalam Mulyono, 2004).

Nilai kuat tekan beton beragam sesuai dengan umurnya dan biasanya nilai kuat beton ditentukan pada waktu beton mencapai umur 28 hari setelah pengecoran. Bentuk konversi umur terhadap kuat tekan beton tampak seperti tabel 2.1. Umumnya pada umur 7 hari kuat tekan beton mencapai 65 % dan pada umur 14 hari mencapai 88 % dari kuat tekan beton pada umur 28 hari.

**Tabel 2.1** Konversi umur terhadap rasio kuat tekan beton

Hari	Rasio	Hari	Rasio	Hari	Rasio	Hari	Rasio
3	0.4000	13	0.8471	23	0.9643	33	1.0161
4	0.4625	14	0.8800	24	0.9714	34	1.0194
5	0.5250	15	0.8900	25	0.9800	35	1.0226
6	0.5875	16	0.9000	26	0.9857	36	1.0258
7	0.6500	17	0.9100	27	0.9929	37	1.0290
8	0.6829	18	0.9200	28	1.0000	38	1.0323
9	0.7157	19	0.9300	29	1.0032	....	....
10	0.7486	20	0.9400	30	1.0065	90	1.2000
11	0.7814	21	0.9500	31	1.0097	....	....
12	0.8143	22	0.9571	32	1.0129	365	1.3500

(Sumber :petunjuk praktikum teknologi beton)

### 2.1.1 Agregat

Agregat menempati 70-75 % volume total dari beton, sehingga sifat-sifat agregat ini mempunyai pengaruh yang sangat besar terhadap perilaku dari beton yang sudah mengeras. Sifat agregat bukan hanya mempengaruhi sifat beton, akan tetapi juga mempengaruhi ketahanan (*durability*, daya tahan terhadap kemunduran mutu akibat siklus dari pembekuan-pencairan) (Chu-Kia Wang, Charles G Salmon, Binsar Hariandja, 1994).

Agregat harus mempunyai gradasi sedemikian rupa sehingga seluruh massa beton dapat berfungsi sebagai benda yang utuh, homogen menghasilkan susunan

beton yang padat. Faktor lain yang perlu diperhatikan dalam pemilihan agregat adalah:

- Agregat harus mempunyai kekuatan yang baik;
- Tahan lama;
- Tahan terhadap cuaca;
- Permukaan harus bebas dari kotoran seperti tanah liat, lumpur dan zat organik.

Secara lengkap fungsi agregat beton adalah:

- Menghemat pemakaian semen untuk mendapatkan beton yang murah;
- Menghasilkan kekuatan beton yang besar;
- Mengurangi penyusutan pada beton;
- Gradasi agregat yang baik menghasilkan beton yang padat.

Agregat yang digunakan dalam campuran beton dapat berupa agregat alam atau agregat buatan (*artificial aggregates*). Secara umum agregat dapat dibedakan berdasarkan ukurannya, yaitu agregat halus dan agregat kasar. Secara garis besar pemilihan agregat yang baik digunakan sebagai material penyusun beton perlu memperhatikan hal-hal sebagai berikut:

- Mutu dan kualitasnya;
- Ukuran dan gradasinya;
- Kebersihannya;
- Kekerasannya;
- Bentuk butirannya;
- Bentuk permukaannya.

### 2.1.2 Semen

Semen merupakan hasil industri dari paduan batu gamping dan tanah liat/lempung atau bahan pengganti lainnya dengan hasil akhir berupa padatan berbentuk bubuk (*bulk*), tanpa memandang proses pembuatannya, yang mengeras atau membatu pada pencampuran dengan air (Wahyudi L, dkk., 1999). Untuk menghasilkan semen, bahan baku yang berasal dari batu gamping dibakar sampai meleleh, sebagian untuk membentuk *clinkernya*, yang kemudian dihancurkan dan ditambah dengan gips (*gypsum*) dalam jumlah yang sesuai.

Semen dapat digolongkan menjadi dua bagian yaitu semen hidraulik dan semen non hidraulik. Semen hidraulik mempunyai kemampuan untuk mengikat dan mengeras di dalam air. Sedangkan semen non hidraulik adalah semen yang tidak dapat mengikat dan mengeras di dalam air, akan tetapi dapat mengeras di udara. Semen yang digunakan dalam pembuatan beton adalah semen hidraulik. Contoh semen hidraulik antara lain kapur hidraulik, semen pozollan, semen terak, semen alam, semen portland, semen alumina, semen ekspansif, semen portland putih, semen warna dan semen-semen untuk keperluan khusus. Untuk semen non hidraulik contohnya adalah kapur (Mulyono, 2004).

Berdasarkan ASTM semen terbagi menjadi beberapa jenis, yaitu:

1. Semen type I (Ordinari Portland Cement) : biasa digunakan untuk bangunan beton biasa dan tidak memerlukan persyaratan khusus.
2. Semen type II (Modified Portland Cement) : Semen Portland yang penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat dan panas hidrasi sedang, digunakan untuk pembetonan masal dan biasa.
3. Semen type III (Rapid Hardening Portland Cement) : Semen Portland yang penggunaannya memerlukan kekuatan yang tinggi pada fase permulaan setelah pengikatan terjadi, digunakan untuk pembetonan di musim dingin.
4. Semen type IV (Low Heat Portland Cement) : Semen Portland yang penggunaannya memerlukan hidrasi rendah, digunakan dalam bangunan terendam.
5. Semen type V (Sulphate Resisting Portland Cement) : Semen Portland yang penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat/air laut.

### 2.1.3 Air

Air diperlukan pada pembuatan mortar agar terjadi reaksi kimiawi dengan semen, untuk membasahi agregat dan untuk melumas campuran agar mudah pengerjaannya. Air yang digunakan untuk membuat beton harus bersih, tidak boleh mengandung minyak, asam, alkali, garam-garam, zat organik, atau bahan-bahan lain yang merusak beton dan baja tulangan. Sebaiknya dipakai air tawar bersih yang dapat diminum (Istimawan Dipohusodo, 1999).

Pasta semen merupakan hasil reaksi kimiawi antara semen dengan air, maka bukan perbandingan jumlah air terhadap total material (semen+pasir) yang menentukan. Air yang berlebihan akan menyebabkan banyaknya gelembung air setelah proses hidrasi selesai, sedangkan air yang terlalu sedikit akan menyebabkan proses hidrasi tidak seluruhnya selesai. Sebagai akibatnya, campuran beton yang dihasilkan akan kurang kekuatannya.

Reaksi yang terjadi akibat penambahan air ke dalam semen portland dinamakan hidrasi. Reaksi tersebut akan menghasilkan senyawa-senyawa hidrat. Senyawa hidrat terdiri dari :

- Calcium Silicate Hydrate ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )
  - Calcium Aluminate Hydrate ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )
  - Calcium Sulfurica Aluminate Hydrate ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )
- yang semuanya disebut "*Cement Gel*".

## 2.2 Beton Bertulang

Beton bertulang adalah beton yang diberi tulangan dimana luas dan jumlah tulangan tidak kurang dari nilai minimum, disyaratkan dengan atau tanpa prategang, dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua material bekerja bersama-sama dalam menahan gaya yang bekerja (SNI, 2002).

Beton bertulang adalah gabungan logis dari dua jenis bahan, yaitu: beton polos yang memiliki kekuatan tekan yang tinggi akan tetapi kekuatan tarik rendah, dan batangan-batangan baja yang ditanamkan di dalam beton dapat memberikan kekuatan tarik yang diperlukan (Chu-Kia Wang, Charles G Salmon, Binsar Hariandja, 1994).

Baja dan beton dapat bekerja sama atas dasar beberapa alasan:

- Lekatan (bond atau interaksi antara batangan baja dengan beton keras sekelilingnya) yang mencegah selip dari baja relatif terhadap beton;
- Campuran beton yang memadai memberikan sifat anti resap yang cukup dari beton mencegah karat baja;
- Angka kecepatan muai yang hampir serupa yakni dari 0,0000055 sampai dengan 0,0000075 untuk beton dan 0,0000065 untuk baja per derajat Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ) atau dari 0,000010 sampai 0,000013 untuk beton dan 0,000012 untuk baja per

derajat Celcius ( $^{\circ}\text{C}$ ) menimbulkan tegangan antara baja dan beton yang dapat diabaikan di bawah perubahan suhu udara.

Beberapa perbedaan sifat dari kedua bahan yaitu beton dan baja seperti disajikan pada tabel 2.2, berikut:

**Tabel 2.2** Perbandingan sifat antara beton dan baja

Kriteria Bahan	Beton	Baja
Kekuatan tarik	Jelek	Bagus
Kekuatan tekan	Bagus	Bagus, tetapi batang yang langsing akan menekuk
Kekuatan geser	Cukup	Bagus
Keawetan	Bagus	Berkarat bila tidak terlindung
Ketahanan akan Kebakaran	Bagus	Jelek (mengalami kehilangan kekuatan secara cepat pada suhu tinggi, dalam waktu singkat)

(Sumber :Istimawan Dipohusodo, 1999)

Dari tabel 2.2 dapat dilihat bahwa tiap-tiap bahan mempunyai kelebihan dan kekurangan. Dengan demikian, apabila keduanya dikombinasikan, baja akan dapat menyediakan kekuatan tarik dan barangkali sebagai kekuatan geser, sedangkan beton berfungsi untuk memikul tegangan tekan sekaligus melindungi baja supaya awet dan tahan akan kebakaran. Kombinasi beton dan tulangan baja akan menghasilkan aksi komposit, yang berarti beton dapat melekat dengan baik mengelilingi tulangan baja. Apabila pelekatan ini tidak mencukupi, tulangan baja akan tergelincir di dalam beton.

Kekuatan tarik beton besarnya kira-kira 9 - 15 % dari kekuatan tekan. Oleh karena itu hampir semua konstruksi beton bertulang direncanakan dengan anggapan bahwa beton sama sekali tidak memikul gaya tarik. Tulangan baja yang direncanakan memikul gaya tarik tersebut, yang dipindahkan oleh pelekatan diantara bidang singgung kedua bahan tersebut.

### 2.2.1 Tulangan baja

Tulangan baja untuk beton terdiri dari batang, kawat dan jaring kawat baja las yang seluruhnya dirakit sesuai dengan standart ASTM. Sifat-sifat terpenting tulangan baja adalah sebagai berikut: modulus young ( $E_s$ ); kekuatan leleh ( $f_y$ );

kekuatan batas ( $f_u$ ); mutu baja yang ditentukan dan ukuran atau diameter batang atau kawat. Walaupun dalam perhitungan tidak diperlukan adanya tulangan baja, suatu jumlah minimum dari tulangan ditempatkan pada elemen struktur tekan untuk melindungi terhadap efek dari momen lentur yang terjadi secara tiba-tiba yang dapat meretakkan bahkan meruntuhkan bagian yang tidak diberi tulangan.

Bilamana batang tulangan ditempatkan pada bagian bawah balok, tepatnya didekat permukaan tarik yang terluar, kekuatan balok tak lagi dibatasi oleh kuat tarik beton dan pemberian tulangan untuk mencegah geseran horizontal, sehingga balok dapat menjadi kuat baik didalam menahan tarikan maupun desakan. Agar dapat memperoleh keuntungan sebesar-besarnya dari tulangan, maka harus dipasang sedekat mungkin pada dasar balok. Bagaimanapun juga, perlu diberi selimut beton untuk mencegah korosi dan memberikan daya tahan terhadap api yang diperlukan.

### 2.2.2 Selimut beton

Selimut beton merupakan penutup dari beton yang digunakan untuk melindungi tulangan dari pengaruh luar. Seperti halnya pengaruh cuaca, udara dan air. Umumnya tebal selimut beton yang ada ditentukan di dalam standart SNI 03-2847-2002 untuk beton bertulang, yaitu tebal selimut beton minimum harus memenuhi ketentuan seperti tabel 2.3.

**Tabel 2.3** Tebal selimut beton (SNI 03-2847-2002)

a) Beton yang dicor langsung di atas tanah dan selalu berhubungan dengan tanah	75 mm
b) Beton yang berhubungan dengan tanah atau cuaca	
Batang D-19 hingga D-56	50 mm
Batang D-16, jaring kawat polos P16 atau kawat ulir D16 dan yang lebih kecil	40 mm
c) Beton yang tidak langsung berhubungan dengan cuaca atau beton yang tidak langsung berhubungan dengan tanah:	
<u>Pelat, dinding, pelat berusuk:</u>	
Batang D-44 dan D-56	40 mm
Batang D-36 dan yang lebih kecil	20 mm

Balok, kolom:

Tulangan utama, pengikat, sengkang, lilitan spiral	40 mm
----------------------------------------------------	-------

Komponen struktur cangkang, pelat lipat:

Batang D-19 dan yang lebih besar	20 mm
----------------------------------	-------

Batang D-16, jaring kawat polos P16 atau ulir D16 dan yang lebih kecil	15 mm
------------------------------------------------------------------------	-------

---

(Sumber :SNI 09-2487-2002 :41)

**2.2.3 Jarak tulangan dan selimut beton untuk beton bertulang**

Sangatlah perlu untuk menjaga timbulnya rongga-rongga pada beton serta kepastian bahwa campuran beton basah dapat melewati tulangan baja tanpa terjadi pemisahan material. Karena kandungan agregat untuk beton struktural sering kali berisi agregat kasar berukuran 0,75 in (diameter 19 mm), maka diperlukan adanya jarak tulangan minimal dan selimut beton minimal yang diperbolehkan. Ini juga berfungsi untuk melindungi penulangan dari karat dan kehilangan kekuatannya dalam kasus kebakaran. Beberapa persyaratan utama pada peraturan ACI 318 adalah:

- Jarak bersih antar tulangan paralel dalam satu acuan tidak boleh kurang dari  $1 d_b$  atau 1 in (25,4 mm);
- Jarak bersih antar tulangan memanjang tidak boleh kurang dari  $1,5 d_b$  atau 1,5 in (38,1 mm);
- Tebal selimut beton minimum untuk balok dan kolom yang dicor di tempat tidak boleh kurang dari 1,5 in, bila tidak berhubungan langsung dengan udara luar maupun tanah. Persyaratan ini berlaku juga untuk sengkang-sengkang miring dan spiral.

**2.2.4 Perilaku sifat dan karakteristik beton bertulang**

Perilaku dan karakteristik beton bertulang merupakan sifat mekanis dari beton yang dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1) Kekuatan tekan ( $f_c'$ )

Kuat tekan beton diawali dengan tegangan tekan maksimum  $f_c'$  dengan satuan  $N/mm^2$  atau MPa. Sebelum diberlakukannya sistem satuan SI di Indonesia, nilai

tegangan menggunakan satuan  $\text{kg/cm}^2$ . Kekuatan tekan beton bergantung pada jenis campuran, sifat-sifat agregat, serta lama dan kualitas perawatan.

#### 2) Kekuatan tarik ( $f_{ct}'$ )

Nilai kuat tekan dan tarik beton tidak berbanding lurus, setiap usaha perbaikan mutu kekuatan tekan hanya disertai peningkatan kecil nilai kuat tariknya. Suatu perkiraan kasar dapat dipakai, bahwa nilai kuat tarik beton normal adalah:

9-15 %  $f_c'$  (Istimawan Dipohusodo, 1999)

10-20 %  $f_c'$  (Edward G. Nawy, 1990)

10 %  $f_c'$  (W. H. Mosley, 1989)

Kekuatan tarik beton yang tepat sulit untuk diukur. Suatu nilai pendekatan yang umum dilakukan dengan menggunakan *modulus of rupture*, adalah tegangan tarik lentur beton yang timbul pada pengujian hancur beton polos (tanpa tulangan), sebagai pengukur kuat tarik sesuai teori elastisitas. Kuat tarik beton juga ditentukan melalui pengujian *split cylinder* yang umumnya memberikan hasil yang lebih baik dan lebih mencerminkan kuat tarik yang sebenarnya.

#### 3) Kekuatan geser

Kekuatan geser lebih sulit diperoleh secara eksperimental dibandingkan dengan percobaan kuat tekan dan tarik, karena sulitnya mengisolasi geser dari tegangan-tegangan yang lainnya. Banyak variasi kekuatan geser yang dituliskan dalam berbagai literatur, mulai dari 20 % dari kekuatan tekan, pada pembebanan normal sampai sebesar 85 % dari kekuatan tekan pada kombinasi geser langsung dan tekan. Desain struktural yang ditentukan oleh kekuatan geser seringkali diabaikan karena tegangan besar biasanya dibatasi sampai harga yang cukup rendah untuk mencegah betonnya mengalami kegagalan tarik diagonal.

#### 4) Modulus elastisitas

Modulus elastisitas sekan atau modulus elastisitas statik adalah kemiringan suatu garis lurus yang menghubungkan titik pusat dengan suatu harga tegangan (sekitar  $0,4 f_c'$ ). Harga ini pada perhitungan desain disebut modulus elastisitas. Modulus ini memenuhi asumsi praktik bahwa regangan yang terjadi selama pembebanan pada dasarnya dapat dianggap elastis.

Penting untuk menentukan secara tepat besarnya harga yang akan diambil sebagai modulus elastisitas.

$E = \text{Tegangan } (\sigma) / \text{Regangan } (\epsilon)$

Modulus elastisitas selain dipengaruhi oleh beban, dipengaruhi juga oleh faktor-faktor lain seperti kelembaban, faktor air semen, umur beton dan temperatur. Harga modulus elastisitas diperlukan untuk peninjauan lentur dan retak dari konstruksi. Harga ini mempengaruhi kekuatan dan mutu beton.

### 2.3 Penampang Balok Bertulang Seimbang, Kurang dan Lebih

Untuk bahan yang bersifat serba sama dan elastis, distribusi regangan maupun tegangan liniernya berupa garis lurus dari garis netral ke nilai maksimum di serat tepi terluar. Dengan demikian nilai tegangannya berbanding lurus dengan nilai regangan dan hal tersebut berlaku sampai dengan dicapainya batas sebanding. Meskipun disadari bahwa pada kenyataannya bahan beton bersifat tidak serba sama (*nonhomogeneous*) dan tidak sepenuhnya elastis tetapi pendekatan secara linier dan prinsip-prinsip dasar teori lentur masih dapat digunakan.

Apabila jumlah tulangan baja tarik ditambah, maka kedalaman blok tegangan beton tekan akan bertambah pula dan oleh karenanya letak garis netral akan bergeser ke bawah lagi. Berdasarkan jenis keruntuhan yang dialami, apakah akan terjadi leleh tulangan tarik atau hancurnya beton yang tertekan, balok dapat dikelompokkan kedalam tiga kelompok sebagai berikut:

#### 1) Penampang *balanced*

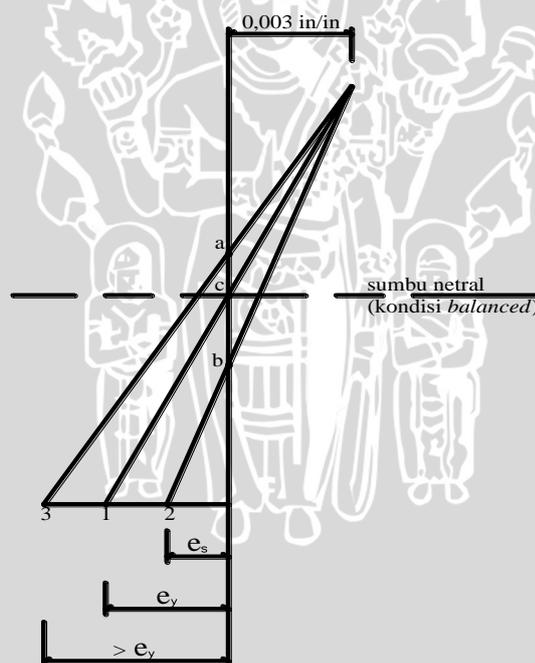
Tulangan tarik mulai meleleh tepat pada saat beton mulai mencapai regangan batasnya dan akan hancur karena tekan. Pada awal terjadinya keruntuhan, regangan tekan yang diijinkan pada serta tepi yang tertekan adalah 0,003 in/in. Sedangkan regangan baja sama dengan regangan lelehnya, yaitu  $\epsilon_y = f_y/E_c$ .

#### 2) Penampang *overreinforced*

Pada saat awal keruntuhan, regangan baja  $\epsilon_s$  yang terjadi masih lebih kecil daripada regangan lelehnya,  $\epsilon_y$ . Dengan demikian tegangan baja ( $f_s$ ) juga lebih kecil daripada tegangan lelehnya,  $f_y$ . Kondisi ini terjadi apabila tulangan yang digunakan lebih banyak daripada yang diperlukan dalam keadaan *balanced*. Berlebihnya tulangan baja akan mengakibatkan garis netral bergeser ke bawah. Keruntuhan ditandai dengan hancurnya beton yang tertekan secara mendadak tanpa diawali gejala peringatan terlebih dahulu.

### 3) Penampang *underreinforced*

Apabila penampang balok beton bertulang mengandung jumlah tulangan baja tarik kurang dari yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan regangan maka garis netral akan lebih naik sedikit dari keadaan seimbang. Tulangan baja terus bertambah panjang dengan bertambahnya regangan di atas  $\epsilon_y$ , tetapi gaya tarik pada tulangan baja tidak bertambah besar. Berdasarkan keseimbangan gaya horizontal  $\Sigma H = 0$ , gaya tekan beton tidak mungkin bertambah sedangkan tegangan tekannya terus meningkat berusaha mengimbangi beban sehingga mengakibatkan luas daerah tekan beton pada penampang berkurang yang berarti posisi garis netral bergerak naik. Proses tersebut berlanjut terus sampai beton pada daerah tekan tidak mampu lagi menahan gaya tekan. Keruntuhan ditandai dengan terjadinya leleh pada tulangan baja dan setelah baja mencapai titik luluh lendutan balok meningkat tajam. Meskipun tulangan baja berperilaku duktail, tidak akan tertarik lepas dari beton sekalipun terjadi kehancuran (Istimawan Dipohusodo, 1994 : 35).



**Gambar 2.1** Distribusi regangan untuk berbagai ragam keruntuhan lentur

(Sumber : Edward G. Nawy, 1990 : 85)

Posisi garis netral c, b dan a akan bergeser ke arah tepi yang akan tertekan untuk penampang balok *underreinforced* pada saat terjadinya keruntuhan. Perilaku ini sesuai percobaan bahwa retak lentur menjalar terus ke arah serat yang tertekan

sampai beton hancur. Jarak vertikal antara titik-titik c, b dan a ke tepi yang tertekan sangat bergantung pada angka tulangan  $\rho = A_s/bd$  dan tidak terlalu berbeda karena regangannya kecil (Edward G. Nawy, 1990 :88).

Untuk peraturan merekomendasikan perencanaan balok dengan tulangan yang bersifat *underreinforced* untuk memberikan peringatan dan resiko akibatnya dapat diminimalisir. SNI 03-2847-2002 pada pasal 12.3.3 menetapkan pembatasan tulangan baja tarik tidak boleh melebihi 0,75 dari jumlah tulangan baja tarik yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan regangan.

$$A_s \leq 0,75 A_{sb} \quad (2-1)$$

Rasio penulangan sebesar

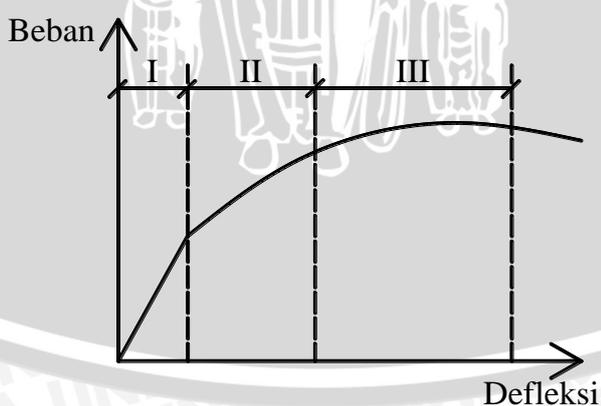
$$\rho = A_s/bd \quad (2-2)$$

Rasio penulangan maksimum

$$\rho_{maks} \leq 0,75 \rho_b \quad (2-3)$$

#### 2.4 Perilaku Keruntuhan Balok

Sebelum balok mengalami keruntuhan, kita dapatkan balok mengalami 3 tahapan yang mana ketiganya merupakan hubungan antara beban-defleksi balok beton bertulang yang pada dasarnya diidealisasikan menjadi bentuk trilinear seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.2. Hubungan ini terdiri atas tiga daerah sebelum terjadinya *rupture* (Edward G. Nawy, 1990 : 256).



**Gambar 2.2** Hubungan beban - defleksi balok beton bertulang

(Sumber : Edward G. Nawy, 1990 : 256)

### 1) Taraf Praretak : Daerah I

Pada taraf praretak, batang-batang strukturalnya bebas retak. Segmen praretak dari kurva beban defleksi pada dasarnya berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis penuh. Tegangan tarik maksimum pada balok dalam daerah ini lebih kecil daripada kekuatan tariknya akibat lentur. Kekakuan lentur ( $EI$ ) balok dapat diestimasi dengan menggunakan Modulus Young ( $E_c$ ) dari beton dan momen inersia penampang beton bertulang.

### 2) Taraf Beban Pascaretak : Daerah II

Pada taraf beban pascaretak, batang-batang strukturalnya mengalami retak-retak terkontrol yang masih dapat diterima, baik distribusinya maupun lebarnya. Dan hampir semua balok terletak pada daerah ini pada saat beban kerja. Daerah praretak diakhiri dengan mulainya retak pertama dan mulai bergerak menuju daerah II pada diagram beban-defleksi seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.2.

Apabila sudah terjadi retak lentur, kontribusi kekuatan tarik beton sudah dapat dikatakan tidak ada lagi. Ini berarti kekuakatan lentur penampangnya telah berkurang sehingga kurva beban-defleksi di daerah ini akan semakin landai dibandingkan dengan taraf praretak. Pada saat mencapai keadaan limit beban retak kerja, kontribusi beton tarik terhadap kekakuan diabaikan. Momen inersia penampang retak tersebut ( $I_{cr}$ ) dapat dihitung dari prinsip-prinsip dasar mekanika.

### 3) Taraf Postserviceability : Daerah III

Pada taraf postserviceability, tegangan pada tulangan tarik sudah mencapai tegangan lelehnya. Diagram beban-defleksi pada daerah III jauh lebih datar daripada daerah-daerah sebelumnya. Ini diakibatkan oleh hilangnya kekakuan penampang karena retak yang cukup banyak dan lebar di sepanjang bentang. Balok ini terus menerus mengalami defleksi tanpa adanya tambahan beban dan retaknya semakin terbuka sehingga garis netralnya terus mendekati serat tepi tertekan. Pada akhirnya terjadi keruntuhan tekan sekunder yang dapat mengakibatkan kehancuran total pada beton daerah maksimum dan segera diikuti terjadinya *rupture*.

## 2.5 Retak Pada Struktur Beton Bertulang

Beban-beban yang bekerja pada struktur, baik yang berupa beban gravitasi (berarah vertikal) maupun beban-beban lain, seperti beban angin (dapat berarah

horizontal), atau juga beban karena susut dan beban karena perubahan temperatur, menyebabkan adanya lentur dan deformasi pada elemen struktur. Lentur pada balok merupakan akibat adanya regangan yang timbul akibat beban luar. Apabila bebannya bertambah, maka pada balok terjadi deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan timbulnya retak lentur di sepanjang bentang balok.

Taraf pembebanan demikian disebut keadaan limit dan keruntuhan pada lentur. Kerena itulah perencana harus mendesain penampang elemen balok sedemikian rupa hingga tidak terjadi retak yang berlebihan pada saat beban kerja, dan masih mempunyai keamanan yang cukup dan kekuatan cadangan untuk menahan beban dan tegangan tanpa mengalami keruntuhan (Edward G. Nawy, 1990).

Bagaian struktur beton pada daerah yang mengalami tarik umumnya memperlihatkan suatu fenomena retak pada permukaannya. Retak-retak ini tidak merugikan kecuali bila lebar retaknya menjadi melebihi batas. Dalam hal ini keawetan beton tergantung karena kondisi tulangnya menjadi terbuka terhadap korosi.

Retak pada beton merupakan kontribusi dan awal dari kesan yang lebih parah lagi yaitu berlangsungnya proses korosi tulangan baja, rusaknya permukaan beton dan dampak kerusakan jangka panjang lainnya. Oleh karena itu pengetahuan perilaku retak dan pengendalian lebar retak merupakan hal penting dalam memperhitungkan kemampuan layan komponen struktur pembebanan jangka panjang.

### 2.5.1 Penggolongan jenis retak pada balok

Pada dasarnya ada tiga jenis keretakan pada balok, yaitu:

#### 1) Retak lentur (*flexure crack*)

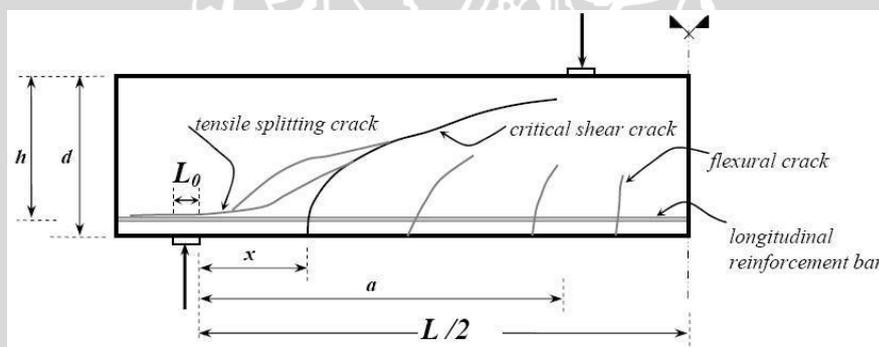
Retak yang terjadi pada daerah yang mempunyai harga momen lentur besar dan arah retak hampir tegak lurus sumbu balok. Retak ini terjadi pada kondisi harga momen lentur besar, sedangkan gaya geser kecil atau rendah. Retak terjadi pada bagian tepi yang mengalami tegangan tarik dan arahnya hampir tegak lurus terhadap sumbu balok.

## 2) Retak geser lentur (*flexure shear crack*)

Retak yang terjadi pada bagian balok yang sebelumnya telah terjadi keretakan lentur, sehingga retak ini merupakan perambatan miring sebagai kelanjutan dari retak lentur yang telah terjadi. Retak ini terjadi pada kondisi momen lentur dan gaya geser sama besar, dimana retak lentur terjadi lebih dahulu. Lebar maupun panjang retak ini dikendalikan oleh adanya tulangan longitudinal. Bila tegangan tarik diagonal pada daerah di atas retak ini melampaui kekuatan tarik beton, maka retak tersebut akan menjalar ke arah diagonal.

## 3) Retak geser pada badan balok (*web shear crack*)

Retak yang biasanya terjadi pada daerah garis netral penampang, akibat gaya geser maksimum, tegangan aksial sangat kecil dan tanpa didahului oleh retak lentur. Pada kondisi tegangan lentur sangat kecil, tegangan tarik diagonal membentuk sudut  $45^\circ$  dan nilainya sama dengan nilai tegangan geser maksimum pada garis netral. Oleh karena itu, retak diagonal ini hampir selalu terbentuk pada daerah sumbu netral (Edward G. Nawy, 1990 dan L. Rahim Wahyudi, A. Syahril, 1997 : 167).



**Gambar 2.3** Jenis keretakan pada balok

(Sumber :

[http://media.viet3g.com/viet3g/uploadedfiles/concrete%2520crack%2520fig1.jpg\\_1272016800.jpg](http://media.viet3g.com/viet3g/uploadedfiles/concrete%2520crack%2520fig1.jpg_1272016800.jpg))

Jenis retak sangat tergantung pada kelangsingannya. Semakin langsing suatu balok semakin besar kecenderungan untuk mengalami retak lentur. Tabel berikut ini dapat digunakan untuk memperkirakan jenis retak yang terjadi dengan menggunakan harga kelangsingan.

**Tabel 2.4** Pengaruh kelangsingan balok terhadap jenis retak

Jenis Balok	Jenis Retak	Kelangsingan Balok	
		Beban Terpusat	Beban Merata
		a/d	L/d
Langsing	Lentur	>6	>16
Sedang/Normal	Tarik Diagonal	2,5 – 6	11 - 16*
Pendek	Geser Tekan / Geser Tarik	1 - 2,5	1 - 5

\*) Untuk beban merata menjadi peralihan antara balok sedang ke balok tinggi.

(Sumber : Nawy, E. G, 1990)

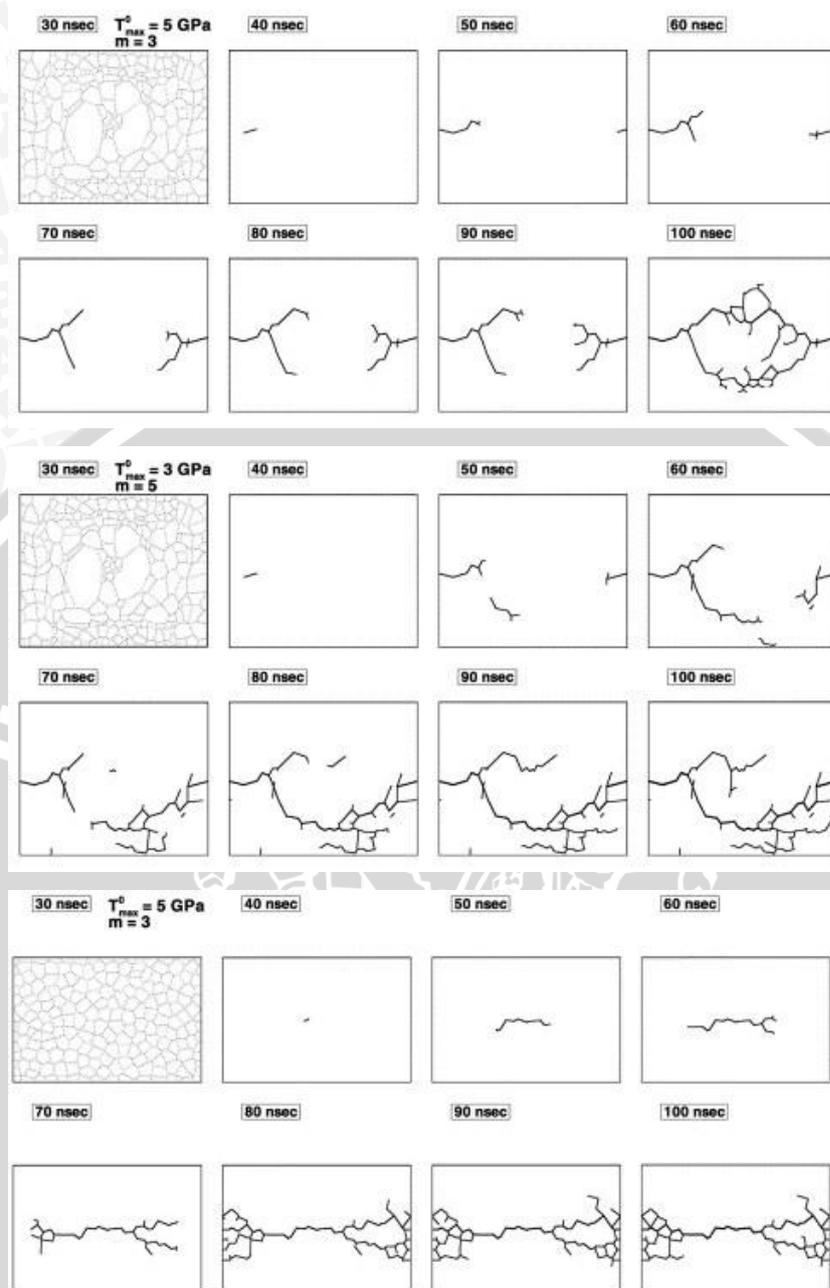
Tegangan yang disebabkan oleh beban, momen dan geser menyebabkan bermacam model kenampakan pola retak pada beton. Sedangkan penggolongan jenis retak berdasarkan gaya luar yang menyebabkan terjadinya retak yaitu :

- Retak beton akibat gaya tarik;
- Retak beton akibat momen;
- Retak beton akibat geser;
- Retak beton akibat torsi;
- Retak beton akibat tegangan lekat;
- Retak beton akibat gaya tekan.

### 2.5.2 Penyebaran pola retak

Pola retak yang terjadi pada badan balok dapat dibagi menjadi dua daerah. Daerah beton yang mengalami tekan dan daerah beton yang mengalami tarik. Sesuai dengan perencanaan pada penelitian ini yaitu balok direncanakan bertulangan liat (*underreinforced*), maka daerah tarik mengalami keruntuhan terlebih dahulu. Retak lentur awal yang terjadi memang selalu berada pada daerah tarik, selanjutnya retak menyebar sedikit demi sedikit ke daerah tekan.

Retak yang terjadi di daerah tekan tersebut tidak terlalu banyak dan masih merupakan retak lentur. Secara umum retak awal terjadi di bawah titik beban. Setelah beban mencapai di atas 90 % dari beban teoritis atau sekitar 78 % dari beban runtuh retak mulai terjadi di tengah bentang.



**Gambar 2.4** Pola penyebaran retak beton

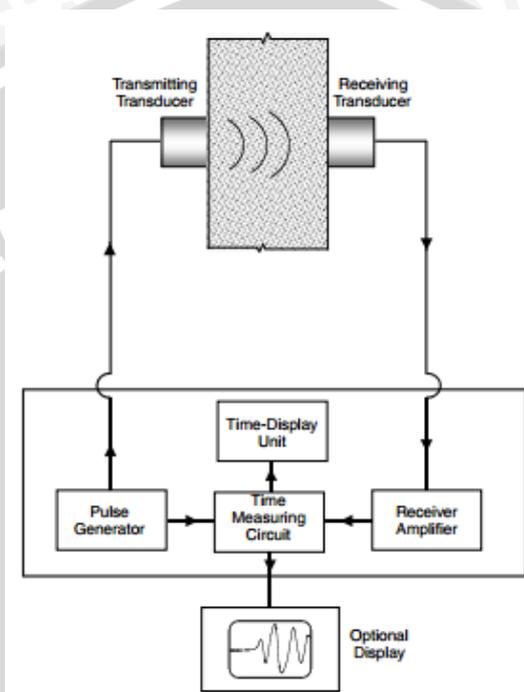
(Sumber : <http://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S1359645401002920-gr7.jpg>)

## 2.6 UPV Test

*Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* merupakan salah satu metode NDT dengan menggunakan perambatan gelombang yang didasari waktu tempuh gelombang dan getaran gelombang *ultrasonic* terhadap lebar benda uji yang dijadikan tempat lintasan gelombang. Sehingga metode NDT tidak secara langsung memberikan hasil

dan nilai seperti pada *Destructive Test* atau DT. Untuk itu diperlukan banyak pengujian agar mendapatkan hasil yang memuaskan.

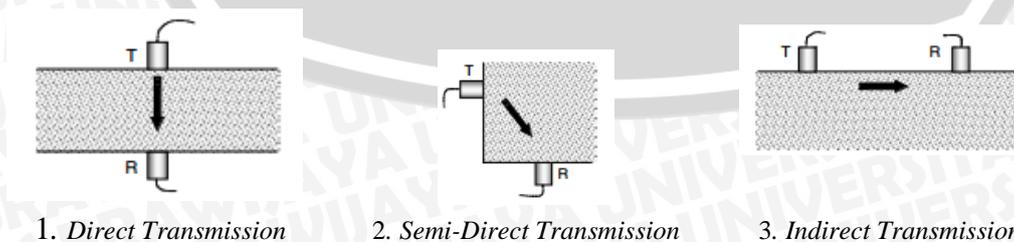
Cara kerja UPV pada dasarnya mengirim getaran gelombang pada beton, menerima dan memperbesar getaran untuk selanjutnya dihitung lama perambatan getaran gelombang tersebut. Gelombang yang digunakan pada metode UPV adalah gelombang jenis *Electro-acoustical transducers*.



**Gambar 2.5** Diagram alir uji UPV

(Sumber : V.M Maholtra dan N.J Carino, 2004)

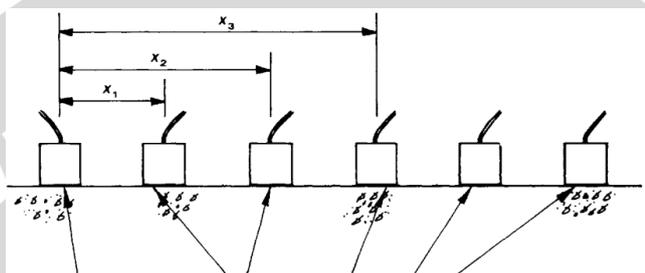
Dalam pelaksanaan pengujian, *transmitter* dan *receiver* diberi medium yang ringan seperti gel. Gel berguna untuk mendapatkan permukaan yang halus pada permukaan benda uji sehingga gelombang lebih mudah untuk merambat. Ada beberapa metode dalam memasang *transmitter* dan *receiver* pada permukaan beton, diantaranya :



**Gambar 2.6** Metode perletakan *transmitter* dan *receiver*

(Sumber : V.M Maholtra dan N.J Carino, 2004)

*Direct transmission* lebih sederhana dalam pemasangan dan sangat efektif untuk mendapatkan sinyal gelombang. *Indirect transmission* merupakan cara yang kurang efektif untuk mendapatkan sinyal gelombang dibandingkan dengan *direct transmission*. Sinyal gelombang sendiri tergantung pada cara penyebaran gelombang pada suatu medium. Getaran gelombang dipengaruhi oleh keadaan permukaan beton dan jarak antara *transmitter* dan *receiver*. Pada *indirect transmission* perlu diperhatikan jarak antara *transmitter* dan *receiver* agar diatur terlebih dahulu seperti yang dikehendaki.

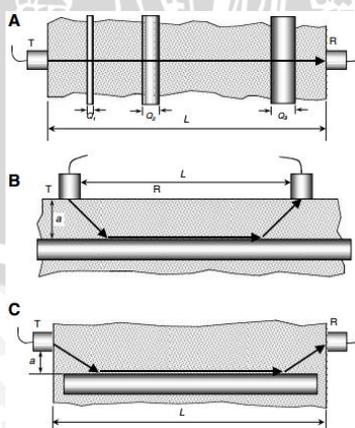


**Gambar 2.7** Jarak pengujian *indirect*

(Sumber : V.M Maholtra dan N.J Carino, 2004)

Uji UPV termasuk metode NDT sehingga tingkat kualitas dari akurasiya berbeda dari DT. Ada berbagai macam faktor yang mempengaruhi pengukuran dengan uji UPV antarlain:

- Kondisi permukaan beton
- Suhu beton
- Jarak tempuh antara *transmitter* dan *receiver*
- Pengaruh terhadap tulangan baja



**Gambar 2.8** Pengukuran pada beton bertulang.

(Sumber : V.M Maholtra dan N.J Carino, 2004)

Ada beberapa pengaruh tulangan baja pada pengujian UPV (perhatikan gambar 2.8) yang akan dijelaskan sebagai berikut:

- A. Gambar 2.8 bagian A menjelaskan posisi tulangan baja tegak lurus terhadap arah rambatan gelombang, dapat diketahui hubungan pengaruh tulangan baja yang ditunjukkan pada tabel 2.5.

**Tabel 2.5** Pengaruh tulangan baja tegak lurus sumbu batang tulangan

Ls/L	V <sub>c</sub> /V		
	Untuk V <sub>c</sub> = 3000 m/s	Untuk V <sub>c</sub> = 4000 m/s	Untuk V <sub>c</sub> = 5000 m/s
1/12	0,96	0,97	0,99
1/8	0,94	0,96	0,98
1/6	0,92	0,94	0,97
1/4	0,88	0,92	0,96
1/3	0,83	0,89	0,94
1/2	0,75	0,83	0,92

(Sumber : V.M Maholtra & N.J Carino, 2004)

dengan :

V = kecepatan gelombang pada beton bertulang (m/s)

V<sub>c</sub> = kecepatan gelombang pada beton (m/s)

V<sub>s</sub> = kecepatan gelombang pada tulangan baja (m/s)

L = Jarak total tempuh gelombang antara *transmitter* dan *receiver*(m)

L<sub>s</sub> = Jarak total tempuh gelombang pada tulangan baja (m)

- B. Gambar 2.8 bagian B menjelaskan posisi tulangan baja sejajar terhadap permukaan beton dengan arah rambatan gelombang.
- C. Gambar 2.8 bagian C menjelaskan posisi tulangan baja sejajar terhadap arah rambatan gelombang.

Pada gambar 2.8 bagian B dan C dapat diketahui hubungan pengaruh tulangan baja yang ditunjukkan pada tabel 2.6. Tabel ini sulit untuk diaplikasikan, hal ini dikarenakan kecepatan gelombang pada tulangan baja.

Tabel 2.6 Pengaruh tulangan baja searah sumbu batang tulangan

$\alpha/L$	$V_c/V$			
	$V_c/V = 0,9$	$V_c/V = 0,8$	$V_c/V = 0,71$	$V_c/V = 0,60$
0	0,9	0,8	0,80	0,60
1/20	0,94	0,86	0,86	0,68
1/15	0,96	0,88	0,88	0,71
1/10	0,99	0,92	0,92	0,76
1/7	1	0,97	0,97	0,83
1/5	1	1	1	0,92
1/4	1	1	1	1

(Sumber : V.M Maholtra &amp; N.J Carino, 2004)

Pendekatan untuk mengetahui pengaruh tulangan hanya terbatas pada tulangan yang susunannya sederhana seperti yang terdapat pada gambar 2.8. Pada susunan yang lebih rumit, tidak mungkin untuk melakukan sebuah koreksi karena sulit untuk menganalisisnya.

Estimasi kuat tekan beton menggunakan metode SONREB. Metode ini berasal dari kata *SONIC* dan *REBOUND*, yakni metode yang menggunakan pengukuran baik *UPV* maupun *rebound hammer* untuk meningkatkan akurasi perkiraan kuat tekan beton. Ada banyak penelitian tentang metode SONREB, metode yang akan digunakan mengikuti Gasparik (1992) berdasarkan kurva korelasi yang berdasar pada manual *UPV*. Hubungan kuat tekan beton, kecepatan *UPV* dan angka *rebound* dinyatakan oleh persamaan gasparik sebagai berikut:

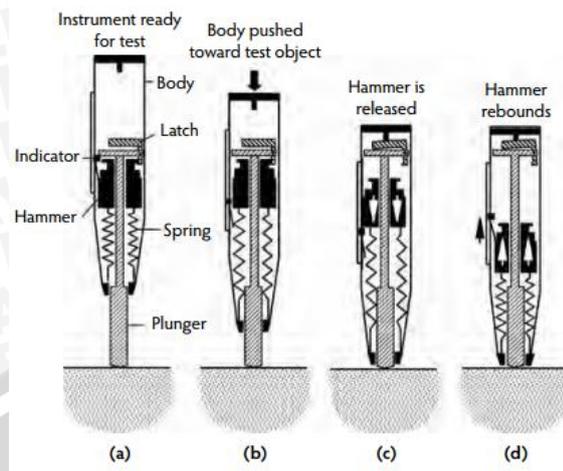
$$f_{ck} = 8,06 \times 10^{-8} V^{1,85} S^{1,246} \quad (2-4)$$

dengan :

- $f_{ck}$  = kuat tekan beton (MPa)
- $V$  = kecepatan gelombang pada beton (m/s)
- $S$  = angka *rebound* ( $Q$ )

## 2.7 Hammer Test

*Rebound hammer* merupakan salah satu dari alat uji beton secara NDT. Bagian utama *rebound hammer* terdiri dari batang pemukul (*plunger*) dan pegas dengan beban (*hammer*) yang terbuat dari baja.



**Gambar 2.9** Keadaan *hammer test*

(Sumber : V.M Maholtra & N.J Carino, 2004)

Untuk menguji beton, badan *rebound hammer* ditekan sehingga batang pemukul tertahan oleh permukaan beton. Ketika bagian *rebound hammer* ditekan, penahan beban terkunci dan melepas beban. Beban terlepas sehingga pemukul batang pemukul untuk menekan permukaan beton dan memantul kembali karena gaya yang dihasilkan oleh pegas. Pemantulan beban dibaca oleh *indicator* sebagai nilai *rebound* (R). Pembacaan dari pemantulan beban dapat dikunci agar mudah dalam membaca nilai *rebound*.

Kekerasan permukaan beton berbanding lurus dengan kekuatan beton. Jika angka *rebound* (R) yang dihasilkan oleh *rebound hammer* rendah menunjukkan bahwa permukaan beton tersebut lunak dan kekuatannya rendah. Nilai *rebound* yang dibaca oleh *rebound hammer* tidak hanya digunakan untuk mengukur kekerasan beton tapi juga dapat menentukan kuat tekan beton. Angka *rebound* yang tinggi menunjukkan beton tersebut keras dan kuat.

**Tabel 2.7** Nilai rata – rata *rebound* dengan kualitas beton

NILAI RATA-RATA <i>REBOUND</i>	KUALITAS BETON
>40	Sangat bagus
30-40	Bagus
20-30	Cukup
<20	Buruk
0	Sangat Buruk

(Sumber : V.M Maholtra & N.J Carino, 2004)

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi kekerasan beton sehingga sangat penting untuk diperhatikan dalam menggunakan *rebound hammer*. Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai *rebound* dan kekerasan beton diantaranya :

- Kehalusan dari permukaan benda uji
- Ukuran dan bentuk benda uji
- Jenis dari agregat kasar
- Umur dari benda uji
- Permukaan dan kondisi kelembapan benda uji
- Jenis semen yang digunakan

Prosedur pengujian *hammer test*:

1. Beton uji berumur 21 dan 28 hari;
2. Area permukaan beton yang diuji ditentukan sendiri sesuai yang dikehendaki;
3. Kondisi permukaan beton harus datar, kering, tidak kasar, dan bebas dari segala material yang menutupinya. Pembersihan dan penghalusan perlu dilakukan agar mendapat kondisi permukaan yang diinginkan. Permukaan beton dapat dihaluskan dengan batu gerinda;
4. Posisikan *rebound hammer* tegak lurus pada area permukaan beton yang telah ditentukan;
5. Tekan *rebound hammer* sampai batang pemukul masuk kembali ke dalam badan *rebound hammer*, sebanyak 10 kali untuk setiap area;
6. Nilai *rebound* dapat langsung ditampilkan pada layar *indicator*;
7. Angka *rebound* dicatat untuk pemeriksaan lebih lanjut;
8. Apabila angka *rebound* dibawah standart deviasi dapat dihapus dan selanjutnya bisa dilakukan pengujian ulang;
9. Data – data yang diperoleh dianalisa lebih lanjut untuk mengetahui kuat tekan beton pada umur tersebut.

Faktor-faktor yang mempengaruhi ketelitian pengujian *hammer test* :

1. Kehalusan dari permukaan beton;
2. Kondisi kelembapan beton;
3. Jenis dari agregat kasar;
4. Jenis semen

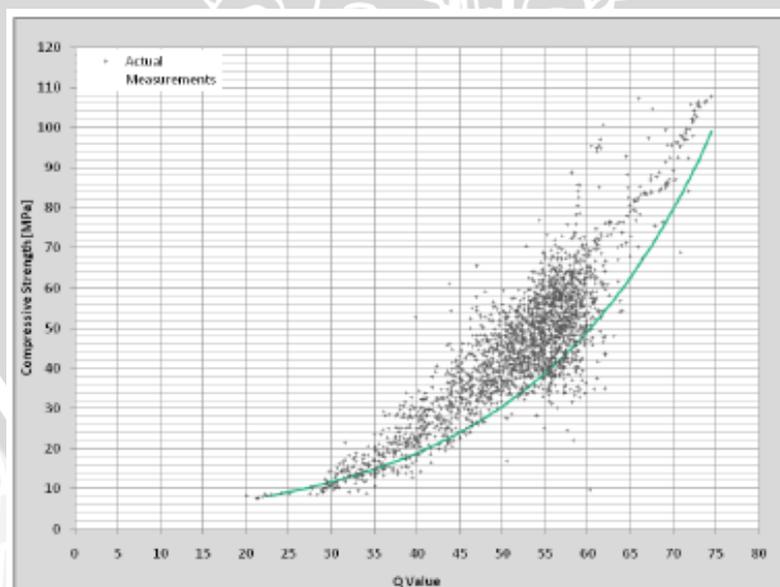
Estimasi kuat tekan dengan angka *rebound* menggunakan kurva standart yaitu kurva *lower 10% percentile*. Kurva ini berasal dari lebih dari 2300 data yang dikumpulkan di bawah tes dikendalikan oleh Institut Federal Penelitian Bahan dan Pengujian di Berlin, Jerman, (BAM), Institut Penelitian Ilmu Konstruksi Provinsi Shaanxi, China dan Universitas Hunan, Cina. Penelitian ini mencakup berbagai macam campuran beton. Rumus dari kurva *lower 10% percentile* adalah :

$$f_{ck} = 2,77e^{0,048Q} \quad (2-5)$$

dengan :

$f_{ck}$  = kuat tekan beton (MPa)  
 $Q$  = angka *rebound* (Q)

Batas yang berlaku adalah dari 22 Q sampai dengan 75 Q, yang sama dengan berbagai kuat tekan 8 MPa sampai dengan 100 MPa.



**Gambar 2.10** Kurva *lower 10% percentile*

(sumber : Manual Silver Schmidt)

## 2.8 Hipotesis Penelitian

Setelah mempelajari kajian pustaka tersebut, maka dapat ditarik beberapa hipotesis penelitian sebagai berikut :

1. Hasil pengujian mutu beton sebelum dibebani dengan menggunakan UPV dan *hammer test* identik dengan hasil pengujian mutu beton dengan uji kuat tekan.
2. Adanya pengaruh besi tulangan dan selimut beton terhadap akurasi alat uji.
3. Adanya korelasi antara penurunan kapasitas balok beton bertulang dengan retak yang terjadi.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

