

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Gambaran Umum Beton

Beton merupakan suatu campuran yang terdiri dari berbagai bahan yaitu semen portland, agregat kasar (krikil), agregat halus (pasir) dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan (*additive*) yang membentuk massa padat (SNI-03-2847-2002). Semen portland dan air bereaksi secara kimia membentuk pasta yang akan mengisi rongga-rongga antara butir-butir pasir dan krikil, sedangkan agregat halus dan kasar tidak mengalami proses kimia karena hanya berfungsi sebagai bahan pengisi yang diikat oleh pasta. Kuat tekan beton akan mencapai kekuatan rencana ($f'c$) setelah beton mengalami proses pengerasan dan perawatan selama 28 hari.

2.1.2 Kekuatan Pada Beton

Beton mempunyai kuat tekan yang tinggi, tetapi kuat tariknya rendah dan bersifat getas. Kekuatan tekan ($f'c$) adalah kemampuan beton untuk menerima gaya tekan per-satuan luas. Kuat tekan beton adalah salah satu parameter yang digunakan untuk mengontrol mutu dari sebuah beton. Pengukuran kuat tekan beton dilakukan dengan uji tekan pada benda uji (sampel) berbentuk kubus dengan ukuran 150 x 150 x 150 mm atau silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Nilai kuat tekan beton ($f'c$) dinyatakan dalam Mpa, dan dari beberapa pengujian didapatkan bahwa karena pengaruh bentuk maka kuat tekan beton dengan benda uji silinder menghasilkan kuat tekan sekitar 83% daripada dengan benda uji kubus. Kuat tekan beton tergantung pada beberapa faktor yaitu:

1. FAS (faktor air semen), merupakan perbandingan antara berat air dengan berat semen di dalam campuran beton (w/c rasio). Salah satu fungsi FAS yaitu untuk membantu terjadinya reaksi kimia yang menyebabkan pengikatan dan berlangsungnya proses pengerasan beton, serta memberikan kemudahan dalam proses pembuatan beton itu sendiri (*workability*). Dalam praktek, nilai FAS diambil antara 0,4 – 0,6 dimana hubungan antara FAS dengan kuat tekan (fc') dapat ditulis menurut Duff Abrams (1991) sebagai berikut.

$$fc' = \frac{A}{B^{1,5FAS}} \dots\dots\dots(2-1)$$

Dengan: A, B = konstanta yang tergantung dari sifat semen, agregat dan lain-lain.

2. Umur beton, dengan bertambahnya umur maka kekuatan pada beton akan bertambah (peningkatan kekuatan beton mula-mula berjalan dengan cepat, kemudian melambat dan dianggap tidak bertambah lagi setelah beton berumur 28 hari terhitung sejak beton tersebut dibuat).
3. Kepadatan (*density*), semakin tinggi kepadatan yang didapatkan pada campuran beton maka semakin tinggi nilai kuat tekan yang dapat dihasilkan dan sebaliknya. Dalam proses pemadatan beton, diusahakan mendapatkan beton yang benar-benar padat yang dimana tidak terdapat pori-pori udara didalamnya. Pemadatan dapat dilakukan dengan cara manual (menggunakan batang tulangan dengan cara menusuk-nusuk campuran beton) atau dengan cara mekanik (menggunakan alat *vibrator*).
4. Sifat agregat, sifat agregat sangat mempengaruhi mutu pada beton. Adapun sifat agregat yang mempengaruhi kekuatan beton antara lain: kadar air, serapan air, bentuk agregat, kekasaran agregat, kadar air agregat, gradasi agregat serta kekuatan agregat.
5. Jumlah semen dan jenis semen yang digunakan, komposisi semen pada campuran beton sangat mempengaruhi kuat tekan yang dibuat. Penentuan jumlah semen dan jenis semen yang digunakan ini mengacu pada tempat dimana struktur bangunan tersebut berdiri, serta penggunaan beton pada struktur bangunan tersebut yang sejak awal perencanaan membutuhkan kekuatan yang tinggi atau normal.
6. Bahan tambah (*additive*), yang dimaksudkan bahan tambahan untuk beton (*concrete admixture*) adalah bahan atau zat kimia yang ditambahkan di dalam adukan beton pada tahap awal sewaktu beton masih segar. Tujuan penggunaan bahan tambah secara umum adalah untuk memperoleh sifat-sifat beton yang diinginkan sesuai dengan tujuan atau keperluan rencana. Dari fungsinya, bahan tambah dapat dibagi menjadi (ASTM C 494/C494M – 05a):
 - a. Tipe A : *water reducing admixtures*, untuk mengurangi penggunaan air dalam menghasilkan beton dengan konsistensi tertentu.
 - b. Tipe B : *retarding admixtures*, untuk memperlambat proses pengerasan adukan beton.
 - c. Tipe C : *accelerating admixtures*, untuk mempercepat proses pengikatan dan penguatan adukan beton.
 - d. Tipe D : *water reducing and retarding admixtures*, berfungsi ganda untuk mengurangi penggunaan air dan memperlambat proses pengikatan dan penguatan adukan beton.

- e. Tipe E : *water reducing and accelerating admixtures*, berfungsi ganda untuk mengurangi penggunaan air dan mempercepat proses pengikatan dan pengerasan adukan beton.
- f. Tipe F : *water reducing and high range admixtures*, untuk mengurangi penggunaan air dan menghasilkan adukan beton dengan konsistensi tertentu sebanyak 12% atau lebih.
- g. Tipe G : *water reducing, high range and retarding admixtures*, untuk mengurangi penggunaan air dan menghasilkan adukan beton dengan konsistensi tertentu sebanyak 12% atau lebih, dan juga untuk memperlambat pengikatan beton.

2.1.3 Tegangan dan Regangan Beton

Tegangan (*stress*) “ σ ” adalah perbandingan antara gaya yang bekerja pada sebuah benda per satuan luas penampang benda tersebut. Tegangan menunjukkan kekuatan sebuah gaya yang menyebabkan perubahan bentuk benda. Apabila sebuah benda ditekan dengan gaya P, maka tegangan yang terjadi adalah tekanan tekan (*compressive stress*), sedangkan apabila benda menerima gaya tarik, maka tegangannya adalah tegangan tarik (*tensile stress*). Secara matematis tegangan dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(2-2)$$

Dengan: $A_{\text{silinder}} = 1/4 * \pi * d^2$; $A_{\text{kubus}} = r^2$

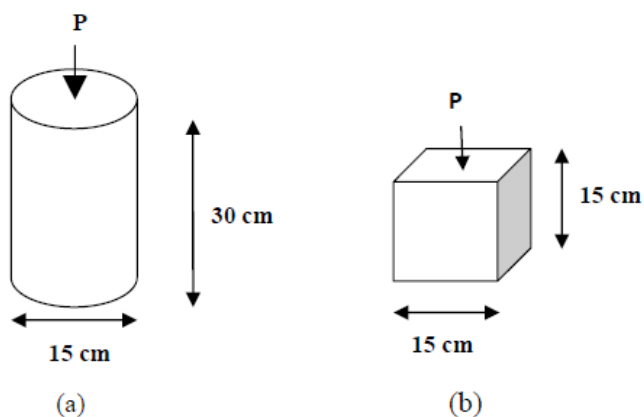
Dimana: σ = Tegangan (MPa)

P = Gaya yang bekerja maksimum (N)

A = Luas penampang benda (mm^2)

d = Diameter silinder (mm)

r = Rusuk kubus (mm)

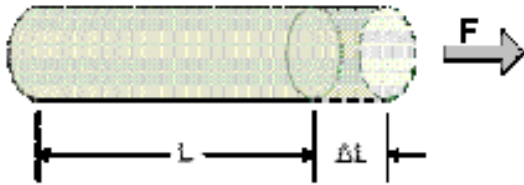


Gambar 2.1 Sampel benda uji silinder beton (a); sampel benda uji kubus beton (b)

Tegangan yang terjadi pada suatu benda mengakibatkan adanya ketegangan antara partikel-partikel yang ada pada material tersebut yang besarnya berbanding lurus. Perubahan tegangan partikel ini dapat menyebabkan pergeseran struktur material regangan atau himpitan yang dapat mengakibatkan terjadinya deformasi bentuk material yaitu perubahan panjang. Perbandingan antara perubahan panjang yang terjadi dengan panjang awal pada suatu benda disebut dengan Regangan (*strain*) “ ε ”. Regangan menunjukkan seberapa jauh ukuran benda tersebut berubah bentuk. Regangan dapat dinyatakan dengan rumus yaitu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \dots\dots\dots(2-3)$$

Dengan : ε = Regangan
 ΔL = Perubahan panjang (m)
 L = Panjang awal (m)



Gambar 2.2 Regangan yang terjadi pada suatu benda

2.1.4 Modulus Elastisitas Beton

Modulus elastisitas atau sering disebut dengan modulus young adalah hubungan linier antara tegangan dengan regangan pada suatu batang yang mengalami gaya tekan maupun tarik. Pada tingkat pembebanan tertentu, semakin besar nilai modulus ini maka nilai regangan elastis yang didapatkan semakin kecil atau dapat dikatakan material tersebut akan semakin kaku (*stiff*)

Nilai modulus elastisitas beton (E_c) tergantung dari modulus elastisitas agregat dan pastanya. Dalam perhitungan struktur boleh diambil nilai E_c dengan menggunakan persamaan:

$$E_c = W_c^{1,5} \cdot 0,043 \sqrt{f_c'} \quad \text{untuk } W_c = 1,5 - 2,5 \dots\dots\dots(2-4)$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} \quad \text{untuk beton normal} \dots\dots\dots(2-5)$$

Dengan: E_c = modulus elastisitas beton (Mpa)
 W_c = berat jenis beton (kg/dm^3)
 f_c' = kuat tekan beton (Mpa)

2.1.5 Rasio Poisson

Sebuah beton saat menerima beban tekan tidak hanya mengalami pengurangan tingginya saja, akan tetapi mengalami ekspansi pada arah lateral. Perbandingan antara ekspansi arah lateral dengan pendekatan longitudinal ini disebut dengan rasio poisson (*poisson's ratio*). Nilai rasio poisson ini bervariasi yaitu 0,11 untuk beton bermutu tinggi dan 0,21 untuk beton bermutu rendah dengan nilai rata-rata sebesar 0,16. Pada perkembangannya belum ditemukan adanya hubungan secara langsung antara nilai dari rasio poisson dengan nilai-nilai lain, seperti perbandingan air–semen, ukuran agregat, lama perawatan.

2.2 Bahan Penyusun Beton

Beton tersusun dari campuran air, semen, agregat kasar dan agregat halus dengan atau tanpa bahan tambahan (*admixture* atau *additive*). Kualitas mutu beton tergantung pada bahan penyusunnya. Oleh sebab itu, dalam memahami dan mempelajari perilaku sebuah beton, diperlukan pengetahuan tentang karakteristik dari masing–masing komponen pembentuknya.

2.2.1 Agregat

Agregat merupakan kandungan paling tinggi dalam campuran beton dibandingkan dengan bahan penyusun lainnya. Volume agregat pada beton biasanya sekitar 70 % sampai 80% terhadap volume total campuran beton. Oleh karena itu, agregat mempunyai pengaruh dan peranan sangat penting terhadap propertis sebuah beton (Mindess et al., 2003). Agregat yang digunakan pada campuran beton harus bergradasi sedemikian rupa agar seluruh massa beton dapat berfungsi sebagai satu kesatuan yang utuh, homogen, rapat, dan variasi dalam perilaku (Nawy, 1998). Berdasarkan ukurannya, agregat dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu:

1. Agregat halus

Agregat halus adalah agregat dengan ukuran butiran kurang dari 4,75 mm (ASTM C 125–06). Agregat halus dapat berupa pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami dari batu–batuan atau berupa pasir buatan yang dihasilkan dari mesin–mesin pemecah batu. Berdasarkan standar ASTM C 33, agregat halus memiliki batas bawah ukuran pasir = 0,075 mm (saringan no. 200) dan batas atas ukuran pasir = 4,76 mm (saringan no.4). Pada standar ASTM C 33/03 “*Standard Specification for Concrete Aggregates*”,

terdapat persyaratan mengenai proporsi agregat dengan gradasi ideal. Persyaratan mengenai proporsi agregat dengan gradasi ideal dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1
Gradasi Saringan Ideal Agregat Halus

| Diameter Saringan (mm) | Persen Lolos (%) | Gradasi Ideal (%) |
|------------------------|------------------|-------------------|
| 9,5 mm | 100 | 100 |
| 4,75 mm | 95 - 100 | 97,5 |
| 2,36 mm | 80 - 100 | 90 |
| 1,18 mm | 50 - 85 | 67,5 |
| 600 μm | 25 - 60 | 42,5 |
| 300 μm | 5 - 30 | 17,5 |
| 150 μm | 0 - 10 | 5 |

Sumber: ASTM C 33/03

Menurut SK SNI 03 – 6861.1 – 2002, disebutkan mengenai persyaratan pasir atau agregat halus yang baik sebagai campuran beton adalah:

- a. Agregat halus terdiri dari butiran yang tajam dan kekerasan dengan indeks kekerasan $\leq 2,2$.
- b. Butir-butir agregat halus harus bersifat kekal artinya tidak pernah pecah atau hancur oleh pengaruh cuaca seperti terik matahari dan hujan.
- c. Tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% dan apabila pasir mengandung lumpur 5% maka pasir harus dicuci agar bebas dari lumpur.
- d. Agregat tidak boleh mengandung bahan-bahan organik terlalu banyak yang harus dibuktikan dengan percobaan warna dengan larutan jenuh NaOH 3%.
- e. Untuk beton dengan tingkat keawetan yang tinggi, reaksi pasir alkali harus negatif.

2. Agregat kasar

Agregat kasar adalah agregat dengan ukuran butir lebih besar dari 4,75 mm. Pada dasarnya agregat kasar atau kerikil terbentuk dari proses disintegrasi batuan alam sama halnya dengan pasir. Kerikil merupakan salah satu agregat kasar dengan jenis *natural sand*. Selain itu jenis lain dari agregat kasar adalah batu pecah atau batu kerikil yang merupakan hasil dari mesin pecah batu atau *coarse sand*.

Menurut PBI 1971 pasal 3.4, sebagai bahan untuk campuran beton, kerikil harus memenuhi beberapa persyaratan yaitu:

- a. Terdiri dari butir keras dan tidak berpori.
- b. Tahan terhadap pengaruh cuaca.
- c. Tidak mudah pecah.

- d. Tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1 % (diukur terhadap berat kering), bila melebihi maka agregat harus dicuci.
- e. Boleh mengandung butir pipih asal jumlah maksimumnya 20 % dari seluruh berat butir agregat.

Pada standar ASTM C 33/ 03 “*Standard Specification for Concrete Aggregates*”, terdapat persyaratan mengenai proporsi agregat dengan gradasi ideal. Persyaratan mengenai proporsi agregat dengan gradasi ideal dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2
Gradasi Saringan Ideal Agregat Kasar

| Diameter Saringan (mm) | Persen Lolos (%) | Gradasi Ideal (%) |
|------------------------|------------------|-------------------|
| 25,00 | 100 | 100 |
| 19,00 | 90 -100 | 95 |
| 12,50 | - | - |
| 9,50 | 20 – 55 | 37,5 |
| 4,75 | 0 – 10 | 5 |
| 2,36 | 0 - 5 | 2,5 |

Sumber: ASTM C 33/03

2.2.2 Semen

Semen merupakan bahan campuran beton yang mengeras dengan adanya air (semen hidrolis) yang memiliki sifat adhesif dan kohesif yang memungkinkan melekatnya fragmen-fragmen mineral menjadi suatu massa yang padat (Siti Nurlina, 2011). Semen yang biasa dipakai untuk beton dinamakan *Portland Cement* (PC), semen ini dibuat dengan cara menghaluskan silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis dan dicampurkan dengan bahan gips. Komponen utama penyusun semen yaitu:

1. Batuan kapur yang dimana mengandung kandungan CaO (kapur, lime).
2. Lempung yang dimana mengandung kandungan dengan komponen SiO₂ (silica), Al₂O₃ (oksida alumunia), serta Fe₂O₃ (oksida besi).

Salah satu faktor yang mempengaruhi kualitas beton (kuat tekan beton) adalah jenis atau tipe semen yang digunakan pada campuran beton tersebut. Semen diusahakan disimpan ditempat yang kering agar mutu semen dapat dijaga dengan baik, semakin baik mutu semen maka semakin tinggi kuat tekan beton yang dihasilkan. Menurut ASTM C150, tipe semen dapat dibagi menjadi 5 bagian berdasarkan kebutuhan konstruksi yang diinginkan. Jenis atau tipe semen adalah:

1. Semen tipe I

Ordinary Portland Cement (OPC), merupakan semen portland jenis umum yang digunakan dalam konstruksi beton secara umum yang tidak memerlukan sifat-sifat khusus sebagaimana jenis lainnya.

2. Semen tipe II

Moderate Sulphate Cement, jenis semen untuk konstruksi biasa, dimana diinginkan perlawanan terhadap sulfat atau panas hidrasi sedang. Jenis semen ini untuk konstruksi pada bangunan yang terletak di daerah dengan tanah berkadar sulfat rendah.

3. Semen tipe III

High Early Strength Cement, semen portland dengan kekuatan awal tinggi (cepat mengeras). Jenis semen ini untuk struktur yang menuntut kekuatan yang tinggi dengan pengerasan beton yang cepat.

4. Semen tipe IV

Low Heat of Hydration Cement, semen portland dengan panas hidrasi rendah dengan kekuatan awal rendah. Jenis ini khusus untuk struktur dengan penggunaan panas hidrasi serendah-rendahnya.

5. Semen tipe V

High Sulphate Resistance Cement, semen portland yang memiliki daya tahan yang tinggi terhadap sulfat. Semen ini terutama ditujukan untuk memberikan perlindungan terhadap bahaya korosi akibat pengaruh air laut, air danau, air tambang, maupun pengarug garam sulfat yang terdapat dalam air tanah. Cocok untuk bangunan-bangunan yang terkena sulfat dengan kadar alkali yang tinggi.

2.2.3 Air

Air berperan penting pada proses pembuatan beton baik sebagai bahan pencampur ataupun pengaduk antara agregat dan semen. Air yang digunakan untuk pembuatan dan perawatan beton harus bersih, tidak boleh mengandung minyak, asam alkali, garam, bahan-bahan organik atau bahan lain yang dapat merusak beton dan tulangan. Dalam hal ini sebaiknya digunakan air tawa bersih yang dapat diminum (Siti Nurlina, 2011)

Sesuai dengan persyaratan SNI 03 – 6817 – 2002, air yang digunakan dalam proses pencampuran beton sebagai berikut.

1. Harus bersih dan bebas dari bahan-bahan yang merusak, yang mengandung minyak, asam alkali, garam, bahan organik, atau bahan-bahan lainnya yang merugikan terhadap beton dan tulangan.

2. Air pencampur yang digunakan pada beton prategang atau pada beton yang di dalamnya tertanam logam aluminium, termasuk air bekas yang terkandung dalam agregat, tidak boleh mengandung ion klorida dalam jumlah yang membahayakan.
3. Air yang tidak dapat diminum tidak boleh digunakan pada beton, kecuali ketentuan berikut terpenuhi, yaitu:
 - a. Pemilihan proporsi campuran beton harus didasarkan pada campuran beton yang menggunakan air dari sumber yang sama.
 - b. Hasil pengujian pada umur 7 dan 28 hari pada kubus uji mortar yang dibuat dari adukan dengan air yang tidak dapat diminum harus mempunyai kekuatan sekurang-kurangnya sama dengan 90% dari kekuatan benda uji yang dibuat dengan air yang dapat diminum.

2.2.4 Bahan Tambahan (*Admixture*)

Bahan tambahan adalah bahan atau zat kimia yang ditambahkan di dalam adukan beton pada tahap awal sewaktu beton masih segar. Tujuan penggunaan bahan tambah secara umum adalah untuk memperoleh sifat-sifat beton yang diinginkan sesuai dengan tujuan atau keperluan perencanaan (Siti Nurlina, 2011). Sifat-sifat yang dapat diperbaiki adalah:

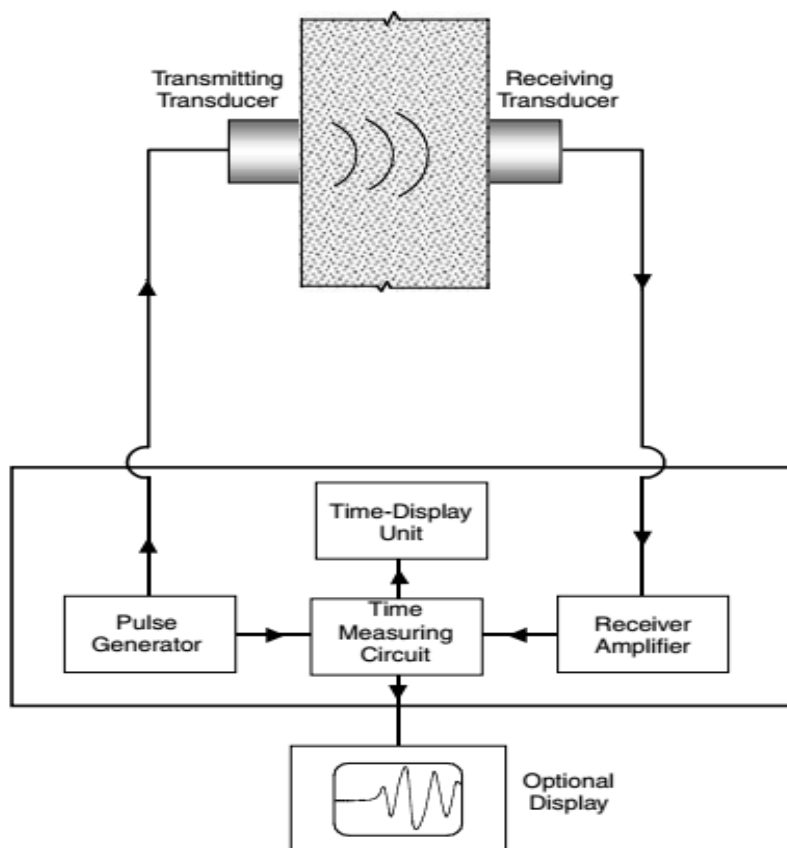
1. Memperbaiki kelacakan beton segar
2. Mengatur faktor air semen pada beton segar
3. Mengurangi penggunaan semen
4. Mencegah terjadinya *segresi* dan *bleeding*
5. Mengatur waktu pengikat awal adukan beton (*initial setting time*)
6. Meningkatkan kuat tekan beton keras
7. Meningkatkan sifat kedap air pada beton keras
8. Meningkatkan sifat tahan lama pada beton keras (lebih awet), terutama pada lingkungan agresif dan kebakaran

2.3 Metode *Non Destructive Test*

2.3.1 UPV Test (*Ultrasonic Pulse Velocity*)

Ultrasonic Pulse Velocity merupakan metode yang digunakan untuk mengukur kecepatan hantaran dari gelombang (*pulse velocity*) ultrasonik yang melewati suatu beton. Seperti pada Gambar 2.3, alat pengujian UPV terdiri dari beberapa komponen utama yaitu:

1. Generator gelombang (*pulse generator*) yang berisi sirkuit untuk menghasilkan gelombang listrik yang akan dikirimkan oleh transmitter,
2. Sepasang transduser, yaitu transduser pengirim (*transmitting transducer*) yang mengubah gelombang listrik menjadi gelombang ultrasonik dan kemudian merembatkannya, serta transduser penerima (*receiving transducer*) yang menerima gelombang dari transmitter, dan
3. Pengukur waktu (*time measuring circuit*), yang berfungsi mencatat waktu transmisi gelombang yang melalui beton.
4. Osiloskop, yaitu berupa layar tambahan untuk memantau perilaku osilasi gelombang yang diterima oleh *receiver*.



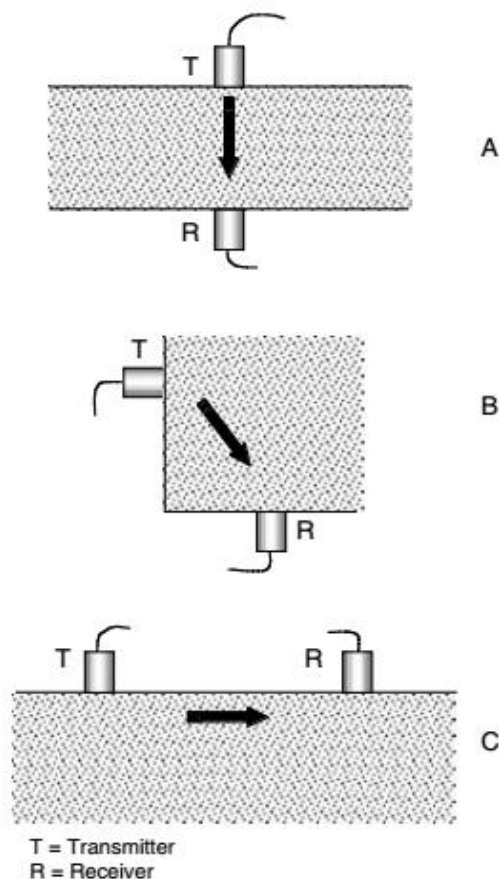
Gambar 2.3 Diagram skematik dari instrumen UPV
 Sumber: V.M Malhotra & N.J Carino (2004)

Dalam pelaksanaan di lapangan, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan, diantaranya adalah metode/konfigurasi pengukuran. Ada pun metode-metode yang dapat dilakukan dengan menggunakan UPV seperti pada Gambar 2.4 antara lain:

- a. *Direct transmission*, yaitu *transmitter* dan *receiver* diletakkan saling berhadapan, sehingga lintasan gelombang tegak lurus dengan permukaan transduser. Panjang lintasan didapat dengan mengukur jarak antar transduser yakni jarak antara 2 sisi

beton yang diuji. Metode ini memberikan hasil paling memuaskan karena transmisi energi gelombang yang diperoleh adalah yang paling besar dibanding metode lainnya.

- b. *Semi-direct transmission* (semi langsung), yaitu kedua transduser dipasang pada dua sisi yang berbeda dan tidak saling berhadapan. Panjang lintasan didapat dengan mengukur jarak miring dari kedua transduser. Metode ini cukup memberikan hasil yang memuaskan dengan ketentuan jarak antara *transmitter* dan *receiver* tidak terlalu jauh.
- c. *Indirect* atau *surface transmission* (tidak langsung), yaitu pemasangan *transmitter* dan *receiver* pada sisi beton yang sama. Pada metode ini jarak antara kedua transduser perlu ditentukan terlebih dahulu seperti yang dikehendaki. Umumnya metode ini dipakai ketika hanya salah satu sisi beton yang dapat diakses. Namun hasil yang diperoleh kurang memuaskan karena amplitudo dari sinyal yang diterima lebih kecil daripada ketika pengujian menggunakan *direct method*.



Gambar 2.4 Konfigurasi pengujian UPV. (A) *Direct method*, (B) *semi-direct method*, dan (C) *indirect method*.

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

Cara kerja alat UPV adalah dengan memberi getaran gelombang longitudinal lewat transduser elektro–akustik, melalui cairan perantara (*couplant*) yang berwujud gel atau sejenis pasta, yang dioleskan pada permukaan beton sebelum tes dimulai. Cairan tersebut berfungsi agar antara permukaan beton dengan transduser tidak terdapat rongga, sehingga gelombang dapat merambat dengan sempurna. Saat gelombang merambat melalui media yang berbeda, yaitu *couplant* dan beton, pada batas *couplant* dan beton akan terjadi pantulan gelombang yang merambat dalam bentuk gelombang longitudinal dan geser. Gelombang geser merambat tegak lurus lintasan, dan gelombang longitudinal merambat sejajar lintasan. Yang pertama kali mencapai transduser penerima adalah gelombang longitudinal, kemudian gelombang ini diubah menjadi sinyal gelombang elektronik yang dapat dideteksi oleh transduser penerima, sehingga waktu tempuh gelombang dapat diukur. Waktu tempuh (T) yang dibutuhkan gelombang untuk merambat pada beton sepanjang lintasan (L) dapat diukur, sehingga cepat rambat gelombang dapat dicari dengan rumus:

$$V = L / T \dots\dots\dots(2-6)$$

Dengan:

V = Kecepatan gelombang longitudinal (m/detik)

L = Panjang lintasan beton yang dilewati (m)

T = Waktu tempuh gelombang longitudinal ultrasonik (detik)

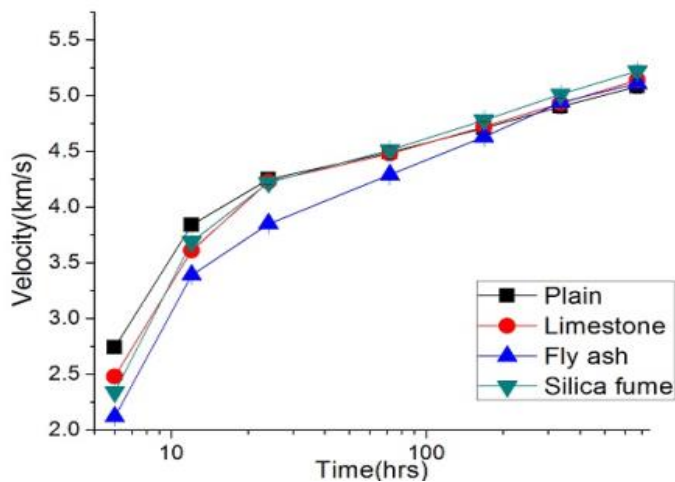
Dari hasil perhitungan kecepatan rambat, secara praktis dapat ditentukan kualitas dari beton tersebut seperti pada Tabel 2.3. Hasil perhitungan kecepatan gelombang longitudinal tersebut juga dapat digunakan untuk menginterpretasikan kualitas dari beton, antara lain:

1. Homogenitas beton
2. Mendeteksi keretakan
3. Menentukan modulus elastis dinamis dan rasio poisson dinamis
4. Mendeteksi rongga
5. Memperkirakan modulus elastisitas beton
6. Memperkirakan kuat tekan beton

Tabel 2.3
Kualifikasi Kualitas Beton Berdasarkan Cepat Rambat Gelombang

| Cepat Rambat gelombang longitudinal | | Kualitas |
|-------------------------------------|----------|--------------|
| km/detik | ft/detik | |
| > 4,5 | > 15 | Sangat Baik |
| 3,5 - 4,5 | 12 - 15 | Baik |
| 3,0 - 3,5 | 10 - 12 | Diragukan |
| 2,0 - 3,0 | 7 -10 | Jelek |
| < 2,0 | < 7 | Sangat Jelek |

Sumber: *International Atomic Energy Agency* (2002)



Gambar 2.5 Perubahan cepat rambat pada beton *plain* dan beton dengan *admixture* terhadap umur beton.

Sumber: B. Sanish & Santhanam (2012)

2.3.1.1 Hubungan Cepat Rambat Gelombang dengan Kuat Tekan Beton

Fungsi utama dari uji UPV yaitu untuk mengetahui kualitas beton berdasarkan cepat rambat gelombang yang dipengaruhi oleh kerapatan beton. Hasil uji UPV tidak memiliki hubungan dengan kuat tekan dari beton secara langsung, tetapi karena kerapatan berbanding lurus dengan kuat tekan maka dapat dicari suatu korelasi antara cepat rambat gelombang dengan kuat tekan beton. B. Sanish & Santhanam (2012) telah meneliti cepat rambat gelombang pada sampel beton dengan umur berbeda-beda hingga umur 28 hari dengan hasil seperti pada Gambar 2.5. Dari penelitian tersebut dapat dibuktikan bahwa penambahan cepat rambat terhadap umur beton lebih tinggi pada umur awal beton, dan grafik akan semakin landai pada umur akhir beton, seperti grafik hubungan kuat tekan dengan umur beton.

Tabel 2.4
Hubungan Kuat Tekan Beton dan UPV

| Persamaan | R ² | Sumber |
|---|----------------|-----------------------|
| $S = 1.146 \exp(0.77V_p)$ | 0,8 | Turgut (2004) |
| $S = 1.19 \exp(0.715V_p)$ | 0,59 | Nashn't et al. (2005) |
| $S = 8.4 * 10^{-9} (V_p * 10^3)^{2.5921}$ | 0,42 | Kheder (1999)A |
| $S = 1.2 * 10^{-5} (V_p * 10^3)^{1.7447}$ | 0,41 | Kheder (1999)B |
| $S = \exp[(-3.3 \pm 1.8) + (0.0014 \pm 0.0004) (V_p * 10^3)]$ | 0,48 | Rio et al. (2004) |

Sumber: Trtnik et al (2007)

Selain itu dalam studinya, Trtnik et al (2007) telah mengumpulkan beberapa rumus hubungan antara kuat tekan beton, S (MPa) dengan UPV, V_p (km/s) dari beberapa percobaan terdahulu seperti pada Tabel 2.4. Evaluasi dari kuat tekan beton biasanya didasarkan pada hubungan empiris terhadap uji *non-destructive* tersebut.

2.3.2 Hammer Test (Rebound Hammer)

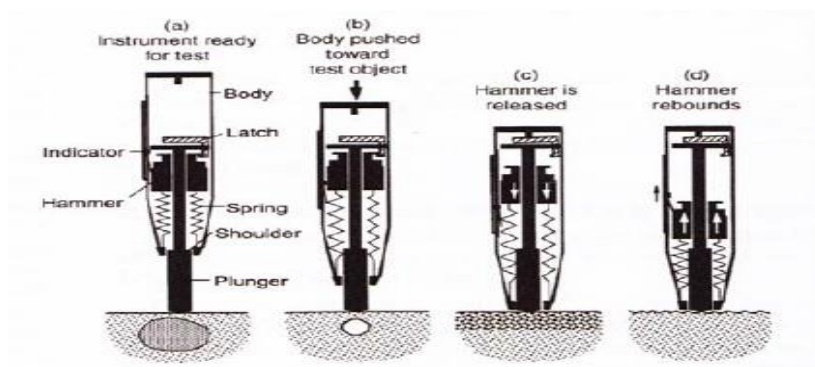
2.3.2.1 Rebound Hammer Manual

Pada tahun 1948, seorang insinyur Ernest Schmidt mengembangkan sebuah alat pengujian yang bernama *rebound hammer*. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur kekerasan pada beton dengan prinsip *rebound* (pantulan) atau memberikan beban tumbukan (*impact*) pada permukaan beton dengan besaran massa tertentu. Metode ini pada dasarnya merupakan pengujian kekerasan permukaan beton untuk mendapatkan angka *rebound* yang digunakan untuk mengetahui kuat tekan beton menggunakan rumus empiris.

Skema alat dan prinsip kerja dari pengujian *rebound hammer* ini sebagai berikut (*ACI Committe Report*).

1. Posisi *plunger* diletakkan secara tegak lurus diatas bidang permukaan beton.
2. Saat dilakukannya pengujian, alat akan ditekan pada beton yang mengakibatkan pegas yang menghubungkan antara *hammer* (sistem massa) dengan badan alat menjadi memanjang.
3. Ketika alat *hammer* ditekan hingga keadaan maksimum, *latch* (palang penahan) secara otomatis terlepas, dan pegas tersebut akan menarik sistem massa menuju beton.
4. Setelah pegas menarik sistem massa ke arah beton, sistem massa tersebut akan menumbuk bahu *plunger* dan kemudian memantul.
5. Memantulnya sistem massa ini akan menggerakkan sebuah indikator geser, yang dimana indikator ini akan mencatat nilai *rebound*.

Skema alur ini dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Skema ilustrasi pengujian *rebound hammer*

Sumber: ACI Committee 228 Report

Nilai *rebound* yang didapatkan hanya dipengaruhi oleh kekerasan bidang beton yang ada di dekat *plunger*. Apabila *plunger* diletakkan di atas bidang permukaan beton yang keras maka pembacaan nilai *rebound* yang dihasilkan akan tinggi, sedangkan apabila *plunger* diletakkan di atas bidang permukaan beton yang lunak dan memiliki rongga udara yang besar maka pembacaan nilai *rebound* yang dihasilkan akan rendah. Dalam mengatasi hal tersebut, maka disyaratkan pengambilan nilai *rebound* tersebut dilakukan sebanyak 10 kali dengan jarak pengambilan nilai sejauh 2,5 cm untuk tiap tembakan. Secara umum alat ini berguna untuk memeriksa keseragaman kualitas beton dan mendapatkan perkiraan kuat tekan beton pada suatu struktur bangunan. Kelebihan dari alat *hammer test* ini adalah biaya pengujian yang lebih murah dari pada pengujian kuat tekan beton, pengukuran dapat dilakukan dengan cepat dan praktis (mudah digunakan) dan alat yang tidak merusak benda ujinya. Sedangkan untuk kekurangannya adalah hanya memberikan informasi tentang karakteristik beton pada permukaannya saja dan hasil dari pengujian ini sangat dipengaruhi oleh kerapatan permukaan, sifat dan jenis agregat yang digunakan, kelembaban beton, derajat karbonisasi dan umur beton, sehingga perlu diingat bahwa betn yang akan diuji haruslah dari jenis dan kondisi yang sama.

2.3.2.2 *Rebound Hammer Digital*

Dengan perkembangan teknologi saat ini, alat *rebound hammer manual* dikembangkan menjadi alat *rebound hammer digital*. Hal ini bertujuan untuk mempermudah penguji dalam mengolah hasil pembacaan nilai *rebound* agar lebih praktis dan efisien. Secara garis besar sistem kerja dari alat *rebound hammer digital* ini hampir sama dengan alat *rebound hammer manual*, akan tetapi alat *rebound hammer digital* ini memiliki beberapa kelebihan yaitu:

1. Dalam menentukan hasil pembacaan, alat ini dapat mengkonversi nilai *rebound* secara langsung (otomatis) sesuai dengan satuan yang diinginkan contohnya kg/cm^2 , N/mm^2 ataupun psi.
2. *Hammer digital* tidak lagi menggunakan sistem massa, oleh sebab itu alat ini tidak memerlukan faktor koreksi terhadap arah tembakan.
3. Dapat memilih beberapa option menu yang dapat mempengaruhi hasil pengujian seperti faktor bentuk dan kedalaman karbonasi.
4. Alat dapat menyimpan dan merekam data penembakan dalam jumlah yang banyak (± 1000 pembacaan) dalam *memory hammer* serta data tersebut dapat dimasukkan ke dalam komputer agar dapat diolah kembali sesuai dengan keinginan penguji.
5. Penembakan dapat dilakukan secara *continue* tanpa jeda pada satu titik penembakan (misal: sepuluh pembacaan), setelah itu hasil yang akan didapatkan adalah nilai rata – rata (mean) atau nilai tengah (median) yang dapat dipilih salah satu sesuai dengan keinginan penguji.



Gambar 2.7 Contoh alat *hammer manual* dan digital dari proceq

2.4 Metode *Destructive Test*

2.4.1 Uji Kuat Tekan (*Compression Test*)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui besarnya beban maksimum yang dapat ditahan oleh beton persatuan luas yang sering disebut dengan kuat tekan beton. Pengujian yang menggunakan alat uji tekan ini dilakukan di dalam laboratorium yang dimana benda uji akan dibebani dengan gaya tekan secara maksimum hingga benda uji tersebut dalam kondisi hancur atau rusak. Menurut SNI 03 – 1974 – 1990, dalam proses pengujian alat-alat yang digunakan antara lain:

1. Alat uji tekan beton (*compression testing machine*) dengan kapasitas mesin sesuai dengan kebutuhan
2. Cetakan benda uji yang berbentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm dan berbentuk kubus yang berukuran 15 x 15 x 15 cm

3. Alat pemadat beton baik berbentuk tongkat baja ataupun dengan alat *vibrator*
4. Alat timbangan
5. Alat pengaduk semen (mixer/molen)
6. Alat pelapis beton (*capping*)
7. Alat uji slump
8. Alat pemeriksa agregat beton
9. Peralatan tambahan seperti sekop, ember, talam, sendok

Dalam proses perencanaan *mix design*, volume campuran beton yang dipersiapkan harus 10% lebih banyak dari volume kebutuhan yang direncanakan. Hal ini dilakukan untuk menutupi kekurangan akan campuran beton yang dapat terjadi dalam proses pembuatan benda uji. Setelah itu dilakukan proses pengadukan campuran beton yang dilakukan dengan menggunakan alat mesin pengaduk semen (*mixer/molen*) ataupun dengan cara manual.

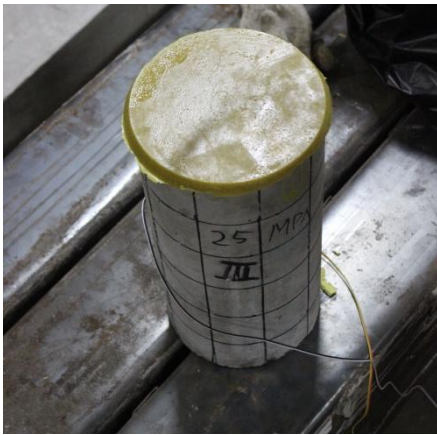
Proses pembuatan, pemerataan dan pematangan benda uji dilakukan dengan memperhatikan hal-hal di bawah ini yaitu:

1. Dalam proses pencetakan benda uji, adukan beton dituang dalam 3 lapis yang berbeda, dimana tiap lapis akan dipadatkan dengan cara menusuk adukan beton dengan menggunakan tongkat baja secara merata sebanyak 25 kali. Pada pemadatan lapisan pertama, hal yang harus diperhatikan adalah tongkat yang digunakan untuk proses pemadatan tidak boleh mengenai dasar cetakan. Setelah itu pada lapisan kedua dan ketiga hal yang harus diperhatikan adalah tongkat baja yang digunakan untuk pemadatan harus masuk $\pm 25,4$ mm kedalam lapisan dibawahnya.
2. Proses pemerataan benda uji dilakukan setelah proses pemadatan telah selesai. Hal yang dilakukan adalah mengetuk sisi cetakan menggunakan palu karet secara perlahan yang bertujuan untuk meratakan adukan beton dan menutup rongga-rongga bekas tusukan. Setelah itu permukaan beton ratakan dan ditutup dengan menggunakan bahan kedap air serta anti karat, kemudian benda uji beserta cetakannya diletakkan ditempat yang bebas dari getaran dan didiamkan selama 24 jam agar beton dapat mengeras dengan baik tanpa ada gangguan apapun.
3. Setelah beton mengeras selama 24 jam, cetakan pada beton dibuka dan benda uji dikeluarkan. Setelah itu hal yang dilakukan adalah proses pematangan benda uji dengan melakukan perendaman benda uji (*curing*), yang dimana benda uji akan direndam ke dalam bak berisi air dengan temperatur $\pm 25^{\circ}\text{C}$. Cara lain yang dapat dilakukan untuk pematangan benda uji adalah dengan cara menyelimuti benda uji

menggunakan karung goni yang basah. Proses pematangan (*curing*) ini dilakukan dalam waktu yang ditentukan oleh perencana serta disesuaikan dengan persyaratan yang ada agar mutu beton dalam pelaksana dapat terkontrol dengan baik.

Setelah proses pematangan dilakukan proses persiapan benda uji yang dilakukan dengan hal-hal di bawah ini yaitu:

1. Benda uji dikeluarkan dari bak *curing*, kotoran-kotoran yang menempel pada benda uji di bersikan menggunakan kain lembab.
2. Benda uji ditimbang berat dan diukur dimensinya.
3. Setelah ditimbang dan diukur dimensinya, benda uji diberikan lapisan *capping* (mortar belerang) pada bagian atas dan bawah permukaan benda uji.
4. Setelah selesai proses *capping* benda uji siap untuk diuji.



Gambar 2.8 Contoh benda uji yang telah melalui proses *capping*

Prosedur pengujian uji kuat tekan beton dilakukan dengan mengikuti langkah-langkah di bawah ini.

1. Benda uji diletakkan secara sentris pada alat uji tekan beton (mesin tekan).
2. Alat uji tekan beton dijalankan dengan penambahan beban sesuai dengan keinginan penguji.
3. Proses pembebanan dilakukan sampai benda uji rusak atau hancur.
4. Setelah benda uji hancur, catat beban yang tertera pada mesin, beban ini menjadi beban maksimum yang dapat ditahan oleh beton
5. Sebagai bukti penelitian, bentuk kerusakan dan proses pengujian pada benda uji dapat didokumentasikan.
6. Kuat tekan beton dapat dihitung dengan cara beban persatuan luas.



Gambar 2.9 Contoh proses uji kuat tekan beton

Dalam menghitung kuat tekan beton, hal yang dilakukan adalah membagi beban maksimum yang tercatat dengan luas permukaan benda uji yang dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$f_c = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (2-7)$$

Dengan: f_c = Kuat tekan beton (Mpa)
 P = Beban maksimum (N)
 A = Kuas penampang benda uji (mm^2)

Berdasarkan SNI 03 – 1974 - 1990, Untuk menentukan hasil kuat tekan beton menggunakan *compression test* terdapat beberapa hal khusus yang harus diperhatikan, yaitu:

1. Dalam proses pencetakan benda uji yang berbentuk kubus berukuran sisi 20 x 20 x 20 cm, adukan beton dituang dalam 2 lapis yang berbeda, yang dimana tiap lapis dipadatkan dengan cara ditusuk sebanyak 29 kali menggunakan tongkat pemadat dengan ukuran diameter sebesar 16 mm dan panjangnya 600 mm.
2. Dalam proses pencetakan benda uji yang berbentuk kubus berukuran sisi 15 x 15 x 15 cm, adukan beton dituang dalam 2 lapis yang berbeda, yang dimana tiap lapis dipadatkan dengan cara ditusuk sebanyak 32 kali menggunakan tongkat pemadat dengan ukuran diameter sebesar 10 mm dan panjangnya 300 mm.
3. Benda uji yang berbentuk kubus tidak perlu melalui proses *capping* (pelapisan menggunakan mortar belerang).
4. Terdapat konversi kuat tekan beton terhadap bentuk benda uji (misalnya: dari bentuk kubus ke bentuk silinder). Berikut daftar konversi kuat tekan beton terhadap bentuk benda uji:

Tabel 2.5

Daftar Konversi Kuat Tekan Beton Dari Bentuk Kubus Ke Bentuk Silinder

| Bentuk benda uji | Perbandingan |
|-------------------------------|--------------|
| Kubus : 15 cm x 15 cm x 15 cm | 1,0 |
| : 20 cm x 20 cm x 20 cm *) | 0,95 |
| Silinder : 15 cm x 30 cm | 0,83 |

(*) 15 cm = diameter silinder

20 cm = tinggi silinder

5. Kuat tekan beton biasanya diukur pada keadaan beton yang berumur 3 hari, 7 hari dan 28 hari.