

## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1 Tinjauan Umum Struktur Kubah**

##### **3.1.1 Pengertian Dasar**

Bentuk lain dari atap lengkung tiga dimensi yang telah diterapkan secara luas adalah kubah setengah bola, yang dapat diperoleh dengan memutar suatu busur dari suatu lingkaran terhadap suatu sumbu vertikal yang melalui pusat lingkaran tersebut. Walaupun secara geometris permukaan struktur ini lebih mudah untuk dijelaskan dibandingkan permukaan hiperbolik paraboloid, tetapi pembuatan konstruksi kubah jauh lebih sulit karena pada kubah tidak ada garis-garis pembentuk konstruksi yang lurus. Joint-joint yang terbentuk seperti juga penutup kubah harus dilengkungkan untuk menyesuaikan dengan bentuk permukaannya, yang menyebabkan konstruksi tersebut menjadi sukar untuk dikerjakan disamping juga harganya menjadi mahal (Nilson, 1991).

##### **3.1.2 Perilaku Struktur**

Perilaku struktur yang ideal adalah memikul beban dengan gaya-gaya membran atau sebidang dan menyebarkan ke seluruh bagian secara merata. Struktur kubah yang memiliki kelengkungan positif akan menyalurkan beban ke tumpuan terutama dengan gaya busur tekan, jika struktur ditumpu di sepanjang tepi kubah.

Gaya luar yang bekerja pada tepi selaput akan diredam dengan cepat oleh tumpuan (Fintel, 1987).

### 3.2 Beton Secara Umum

Beton merupakan bahan konstruksi yang mengalami perkembangan pesat dalam penggunaan di lapangan. Produksi beton tidak sesederhana hanya dengan mencampurkan bahan-bahan dasar, namun harus memperhitungkan berbagai hal seperti pemilihan bahan, perbandingan bahan, cara pengadukan, pengerjaan, pemadatan dan rawatan untuk memperoleh beton segar dan beton keras yang baik. Kelebihan beton adalah memiliki kuat tekan yang tinggi, biaya produksi relatif murah, beton segar mudah diangkut maupun dicetak, dan biaya rawatan yang rendah. Namun, beton mempunyai beberapa kelemahan yaitu kuat tarik yang rendah dan dipengaruhi oleh faktor internal maupun eksternal yang menimbulkan kerusakan, antara lain (Nyoman Parka, 2000) :

1. penyusutan, apabila beton dibiarkan pada udara terbuka maka sebagian air akan menguap sehingga setelah kering volumenya akan menyusut dan menyebabkan keretakan yang sangat merugikan,
2. perubahan volume oleh perubahan sifat thermal antara agregat dan pasta semen,
3. reaksi alkali-silika, merupakan reaksi antara kandungan silika aktif dalam agregat dan alkali dalam semen, reaksi ini akan menimbulkan pemuaihan yang dapat mengakibatkan retakan atau pecahnya pasta semen,
4. tidak kedap (*permeable*) beton,

5. serangan zat-zat kimia yang merusak beton seperti sulfat, klorida, asam, karbon dioksida dan soda,
6. proses karbonisasi yaitu bersenyawanya gas karbondioksida di udara dengan kapur pada beton berakibat turunnya pH beton dan mendorong terjadinya korosi.

Untuk meningkatkan kemampuan beton terhadap faktor-faktor yang menimbulkan kerusakan tersebut dan peningkatan tuntutan struktur modern yang memerlukan sifat maupun kekuatan yang khusus, maka dikembangkan beton kekuatan tinggi (*high strength concrete*) dan beton kinerja tinggi (*high performance concrete*).

Menurut ACI, beton kekuatan tinggi (*high strength concrete*) didefinisikan sebagai beton yang mempunyai kuat tekan silinder melebihi 41 MPa. Beton kinerja tinggi (*high performance concrete*) menurut Said Iravani sebagai beton yang mempunyai kinerja khusus, tidak selalu dapat terpenuhi dengan menggunakan bahan konvensional, dan membutuhkan pelaksanaan pencampuran serta perawatan yang baik.

### **3.3 Beton Kinerja Tinggi**

Prosedur pembuatan campuran beton kinerja tinggi pada dasarnya hampir sama dengan beton normal, tetapi berbeda pada proses pemberian bahan-tambah (*admixture*) yang menggantikan sebagian dari kandungan semen dalam campuran tersebut. Untuk beton yang mempunyai kuat tekan sangat tinggi sering diperlukan agregat yang berbutir lebih kecil. Dalam *mix design* beton kinerja tinggi, dikenal beberapa tipe bahan tambahan untuk memodifikasi kekuatan beton, seperti

*superplasticizer* (pengurang kandungan air dalam campuran beton), *fly ash* (abu terbang), *polymers*, *silica fume*, dan debu kerak tungku (Suwandojo Siddiq, 2000).

Bahan-tambah tersebut memiliki keunggulan yang berbeda, namun dapat digunakan secara bersamaan tergantung pada kinerja beton yang diharapkan. *Superplasticizer* umumnya digunakan untuk meningkatkan workabilitas campuran, selain itu dapat meningkatkan kepadatan beton sehingga kekuatan beton juga meningkat. *Fly-ash* menguntungkan pada volume beton yang besar karena mampu mengurangi hidrasi thermal yang dapat menimbulkan keretakan. Penggunaan *silica fume* akan mengisi pori-pori pada daerah transisi (*transien zona*) antara pasta semen dengan agregat, sehingga meningkatkan kekuatan beton.

Penggunaan beton kinerja diharapkan memiliki kelebihan dalam penggunaannya sebagai bahan konstruksi modern, antara lain (Supartono, 1998) :

1. pada beton segar (*fresh concrete*),
  - a. kemudahan pengerjaan pengecoran (*workability*),
  - b. kemudahan pemompaan ke tingkat yang tinggi (*pumpability*),
  - c. panas hidrasi yang rendah (*low heat of hydration*),
  - d. mutu awal yang tinggi (*high early strength*),
  - e. penundaan waktu-ikat awal (*retardation*),
2. pada beton yang sudah mengeras (*hardened concrete*),
  - a. mutu kuat tekan yang tinggi (*high strength*),
  - b. keawetan yang tinggi secara jangka panjang (*durability*),
  - c. kedap air dan udara (*low water and air tightness*),
  - d. ketahanan terhadap korosi sulfat (*sulphate corrosion resistance*),

- e. penetrasi klorida yang rendah (*low chloride penetration*),
- f. ketahanan terhadap cuaca dingin beku (*frost resistance*),
- g. susut yang rendah (*low shrinkage*),
- h. deformasi dan rangkai yang rendah (*low deformation and creep*),

Beton kinerja tinggi tidak selalu mengharuskan semua kinerja tersebut dimiliki sekaligus, melainkan hanya kinerja yang sesuai dengan jenis pekerjaan. Untuk mencapai tujuan tersebut secara optimal, penggunaan beton kinerja tinggi pada umumnya menuntut mutu kuat tekan yang tinggi.

### 3.3.1 Persyaratan Bahan-Bahan Penyusun

#### 1. Semen

Semen yang dihasilkan oleh suatu pabrik mungkin berbeda sifat fisik dan kimia dengan semen produk pabrik yang lain, beton kinerja tinggi memerlukan kandungan bahan pengikat yang bermutu tinggi. Kehalusan butiran bahan pengikat sangat menentukan dan mempengaruhi *workability* dari campuran beton saat masih segar dan kuat tekannya setelah mengeras (Suwandojo Siddiq, 2000). Jenis semen portland di Indonesia (PUBI 1982) berdasarkan standar ASTM, dibagi menjadi lima macam.

1. Tipe I, untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan khusus.
2. Tipe II, untuk penggunaan yang memerlukan ketahanan terhadap sulfat dan panas hidrasi sedang.
3. Tipe III, untuk penggunaan yang menuntut persyaratan kekuatan awal yang tinggi.

4. Tipe IV, untuk penggunaan yang menuntut persyaratan panas hidrasi yang rendah.
5. Tipe V, untuk penggunaan dengan persyaratan ketahanan terhadap sulfat yang tinggi.

Beton kinerja tinggi dapat diproduksi dengan baik menggunakan semen tipe I, II, dan III (Shah, 1994).

## **2. Agregat Kasar (Kerikil)**

Pada beton kinerja tinggi digunakan agregat kasar dengan tingkat penyerapan air kurang dari 1%, sehingga kadar air total pada beton segar akan lebih mudah dikontrol. Hal ini dapat mengurangi terjadinya kekurangteraturan mutu dan nilai slump yang dihasilkan. Agregat kasar sebaiknya mempunyai bentuk fisik kubikal dan tajam untuk menghasilkan kuat tekan beton yang tinggi. Ukuran maksimum butiran agregat berdasarkan penelitian, menunjukkan bahwa agregat dengan ukuran butiran kurang dari 15 mm menghasilkan beton yang berkekuatan tinggi. Namun penggunaan agregat dengan ukuran maksimum butiran kurang dari 25 mm, masih mampu menghasilkan mutu beton yang tinggi. Kuat tekan agregat kasar tidak boleh lebih rendah dari kekuatan butir semen, dan harus bersih dari bahan organik yang merusak beton seperti lumpur maupun bahan kimia. Kandungan lumpur dan bahan organik untuk agregat kasar disyaratkan maksimum 1%, apabila lebih agregat harus dicuci. Selain itu gradasi yang baik dan teratur perlu diusahakan, dengan pengambilan dari sumber yang sama (Supartono, 1998).

### 3. Agregat Halus (Pasir)

Pasir merupakan bahan pengisi, dengan ukuran butir kurang dari 5 mm. Menurut standar ASTM (*American Society of Testing Materials*) ukuran butir pasir bervariasi antara saringan no. 4 sampai no. 100. Menurut PBI 1971, agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 2,5% (ditentukan dari berat kering). Agregat halus yang digunakan disarankan mempunyai bentuk partikel bulat dengan tekstur permukaan halus. Untuk beton kinerja tinggi disarankan menggunakan pasir dengan nilai Modulus Kekelusan Butir di antara 2,5 sampai 3,2. Hal ini adalah untuk memenuhi persyaratan *workability*. Semakin rendah nilai modulus kehalusan butir makin rendah sifat *workability* beton sehingga memerlukan jumlah air yang lebih banyak (Suwandojo Siddiq, 2000). Nilai modulus kehalusan butir didefinisikan sebagai jumlah persen kumulatif dari butir-butir agregat yang tertinggal di atas suatu set ayakan kemudian dibagi seratus.

### 4. Air

Air merupakan komponen campuran beton yang berpengaruh pada faktor air-semen, sehingga dapat menentukan kekuatan dan kemudahan pekerjaan. Untuk mendapatkan campuran beton yang baik, maka air harus bersih dan bebas dari kandungan minyak, asam, alkali, bahan organik atau bahan lain yang dapat merusak beton atau baja tulangan. Pada dasarnya air yang layak sebagian air minum, baik untuk digunakan pada campuran beton (Suwandojo, 2000). Pemakaian air untuk campuran beton sebaiknya memenuhi persyaratan kandungan lumpur kurang dari 2 gram/liter, kandungan garam tidak lebih dari 15 gram/liter, kandungan khlorida

kurang dari 0,5 gram/liter, dan tidak mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gram/liter.

## 5. Bahan-tambah

Bahan-tambah adalah bahan yang berfungsi meningkatkan dan memperbaiki sifat beton untuk mencapai kinerja yang baik. Bahan-tambah yang banyak digunakan adalah *fly-ash*, *silica fume*, dan *superplasticizer*.

*Fly-ash* atau abu terbang diperoleh dari sisa pembakaran batu bara, berupa serbuk yang sangat halus. *Fly-ash* bersifat pozzolan, yaitu mempunyai kandungan utama silika ( $\text{SiO}_2$ ) dan alumina, berbutir halus berupa partikel bulat, tetapi tidak mempunyai sifat hidrasi seperti semen. Penggunaan *fly-ash* pada campuran beton memberikan keuntungan, butiran yang halus mengisi pori-pori beton, sehingga memperkecil porositas (Supartono, 1998).

*Silica fume* adalah abu pembakaran dari proses pembuatan *silicon metal* atau *silicon alloy* dalam tungku pembakaran listrik. Butiran partikel *silica fume* mempunyai ukuran antara 0,1 sampai 0,2  $\mu$  meter, dengan komposisi kimia sebagai berikut:  $\text{SiO}_2$ : 93,3%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 0,8%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : 1,6%,  $\text{CaO}$ : 0,3%,  $\text{SO}_3$ : 0,2%,  $\text{MgO}$ : 0,5%, L.O.I: 1,5%, Alkali: 0,17% (Said Iravani, 1996). Penggunaan *silica fume* lebih dari 5% dari kandungan semen akan meningkatkan kebutuhan air pada campuran, hal ini disebabkan besarnya luas total permukaan *silica fume* yang harus dibasahi. Beton segar dengan *silica fume* lebih kohesif akan memperkecil segregasi (ACI Committee 234). Kandungan  $\text{SiO}_2$  dalam *silica fume* akan bereaksi dengan  $\text{Ca(OH)}_2$  yang terbentuk dari reaksi semen dan air, reaksi ini menghasilkan C-S-H. Berkurangnya



$\text{Ca(OH)}_2$  dalam campuran akan meningkatkan kekedapan dan kekuatan beton (Subakti, 1993)

*Superplasticizer* diperlukan karena kondisi w/c yang rendah pada beton mutu tinggi atau sangat tinggi, untuk bisa mengontrol dan menghasilkan nilai slump yang optimal pada beton segar sehingga meningkatkan kinerja pengecoran. Penggunaan *superplasticizer* sesuai dengan standar ASTM-C.494-81 tipe F, yaitu bahan-tambah yang dapat mengurangi air 10% sampai 30% dengan waktu-ikat normal. Dosis yang sebaiknya digunakan adalah 6 oz sampai 20 oz setiap 100 lbs (177 mL sampai 591 mL setiap 45 kg) kandungan semen. Bahan ini selain mengurangi jumlah air yang digunakan, juga mempermudah pengaturan susunan partikel semen dalam campuran beton. Dengan penambahan *superplasticizer* gaya tarik permukaan semen dapat dihilangkan, sehingga pengelompokan partikel semen dapat dihindari.

### 3.3.2 Kuat Tekan Beton Kinerja Tinggi

Secara umum kuat tekan beton kinerja tinggi dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti rasio air semen, umur beton, kualitas agregat dan bahan-tambah yang digunakan. Rasio air semen yang rendah  $[\text{w}/(\text{c}+\text{p})]$  merupakan faktor yang paling menentukan, hal ini meminimalkan porositas beton yang terjadi. Pada beton kinerja tinggi biasanya digunakan  $[\text{w}/(\text{c}+\text{p})]$  antara 0,35 sampai 0,45 sedangkan untuk beton kekuatan tinggi berkisar antara 0,2 sampai 0,35. Peningkatan kekuatan beton umumnya mencapai maksimal pada umur 28 hari, namun penggunaan bahan-tambah yang bersifat pozzolan memberikan peningkatan kekuatan sebesar 10% sampai 15% sampai umur 90 hari. Oleh karena itu, perlu mempertimbangkan kuat tekan beton

pada umur 56 hari atau 90 hari sebagai parameter kuat tekan beton. Penggunaan agregat kasar dengan bentuk kubikal dan tajam memberikan daya-lekat mekanik yang lebih baik antara agregat dengan mortar sehingga meningkatkan kuat tekan beton. Untuk meningkatkan kuat tekan beton digunakan ukuran maksimum butiran agregat kasar yang kecil, ukuran butir yang besar akan memperkecil luas permukaan agregat sehingga mengurangi lekatan antara pasta semen dengan agregat.

Sebelum pekerjaan pengecoran dilaksanakan, perlu dilakukan pembuatan dan pengujian awal terhadap benda uji dengan *mix design* yang akan digunakan di lapangan. Pengujian tersebut dimaksudkan untuk mengetahui kuat tekan beton yang tercapai menggunakan rancangan campuran yang ditentukan, terhadap kuat tekan yang diharapkan. Rawatan yang dilakukan adalah dengan merendam benda uji selama 28 hari sampai saat pengujian, sesuai standar rawatan di laboratorium.

Produksi beton di lapangan dipengaruhi oleh variasi bahan terutama agregat, cara pengadukan, ketrampilan dan stabilitas pekerja. Hal tersebut dapat mengakibatkan mutu beton tidak seragam bahkan memungkinkan tidak tercapainya mutu beton yang disyaratkan. Untuk dapat mengetahui mutu beton yang diproduksi di lapangan perlu dilakukan pengambilan sampel, menurut ACI 318M-95 sub bab 5.6.1.1 dan 5.6.1.2, frekuensi pengambilan sampel adalah sebagai berikut ini.

1. Persyaratan minimum frekuensi sampel benda uji beton diambil :
  - a. satu kali setiap hari pada satu kelas beton selama pengecoran,
  - b. tidak kurang dari satu kali setiap  $120 \text{ m}^3$  setiap hari,

- c. tidak kurang dari satu kali setiap 500 m<sup>3</sup> luas pengecoran *slab* atau *wall* setiap hari, jika rata-rata tebal *slab* atau *wall* kurang dari 250 mm maka disyaratkan pengambilan benda uji satu kali setiap 120 m<sup>3</sup> pengecoran.
2. Jika dari volume total pengecoran dilakukan pengambilan sampel berdasarkan persyaratan nomor 1, diperoleh kurang dari 5 sampel kuat tekan. Maka harus diambil minimal 5 sampel secara acak pada pengecoran atau diambil sampel setiap adukan apabila pada pengecoran digunakan kurang dari 5 kali adukan.

Sampel selanjutnya diuji di laboratorium untuk kemudian dievaluasi. Berdasarkan hasil pengujian tersebut dihitung berat satuan beton dan kuat tekan beton berdasarkan persamaan :

$$A_i = \frac{1}{4} (\pi \cdot D^2) \quad (3.1)$$

$$f_{c'i} = \frac{P_i}{A_i} \quad (3.2)$$

$$w_i = \frac{W_i}{V_i} \quad (3.3)$$

Dengan :

$f_{c'i}$  = kuat tekan beton (MPa)

$P_i$  = beban maksimal (KN)

$A_i$  = luas permukaan silinder yang ditekan (mm<sup>2</sup>)

$D$  = diameter silinder (mm)

$w_i$  = berat satuan beton (kg/m<sup>3</sup>)

$W_i$  = berat silinder beton (kg)

$V_i$  = volume silinder (m<sup>3</sup>).

Kuat tekan rata-rata dan berat satuan beton rata-rata dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$f_c'r = \frac{\sum f_c'i}{n} \quad (3.4)$$

$$w_r = \frac{\sum w_i}{n} \quad (3.5)$$

Dengan :

$f_c'r$  = kuat tekan rata-rata (MPa)

$f_c'i$  = kuat tekan beton hasil uji (MPa)

$w_i$  = berat satuan beton ( $\text{kg/m}^3$ )

$w_r$  = berat satuan beton rata-rata ( $\text{kg/m}^3$ )

$n$  = jumlah benda uji

Nilai kuat tekan yang dicapai pada pengujian awal di laboratorium dapat digunakan sebagai evaluasi terhadap kuat tekan beton yang dihasilkan di lapangan. Menurut peraturan ACI 318-95, sub bab 5.6.3 disebutkan bahwa kuat tekan benda uji beton yang dihasilkan di lapangan dengan metode rawatan lapangan (*field-cured specimens*) menurut ASTM C 31, tidak boleh kurang dari 0,85 kuat tekan beton yang diproduksi dan dirawat dengan standar laboratorium (*standart laboratory moist-cured specimens*).

Untuk mengetahui kuat tekan beton ( $f_c'$ ) riil dari hasil pengujian digunakan persamaan berikut :

$$f_c' = f_c'r - 1,64.S_d \quad (3.6)$$

Dengan menggunakan persamaan menurut ACI 318-95 sub bab 5.3.2, sebagai berikut

$$f_c' = f_c'r - 1,32.S_d \quad (3.7)$$

Dengan :

$f_c'$  = kuat tekan riil dari hasil pengujian (MPa)

$f_c'r$  = kuat tekan rata-rata dari pengujian (MPa)

$sd$  = standar deviasi data kuat tekan hasil pengujian (MPa).

Nilai standar deviasi dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum (f_c'i - f_c'r)^2}{n - 1}} \quad (3.8)$$

Dengan:

$f_c'r$  = kuat tekan beton rata-rata hasil pengujian (MPa)

$f_c'i$  = kuat tekan beton hasil pengujian (MPa)

$f_c'$  = kuat tekan beton rencana (MPa)

$n$  = jumlah benda uji

$sd$  = standar deviasi (MPa)

Pada peraturan ACI 318-95 sub bab 5.3.1.2, apabila jumlah data hasil pengujian kuat tekan kurang dari 30 buah, maka perlu dilakukan modifikasi terhadap nilai standar deviasi. Modifikasi tersebut ditunjukkan dalam tabel 3.1. Untuk pengujian dengan sampel kurang dari 15 benda uji, nilai  $f_c'$  dari hasil pengujian tidak dapat dihitung dengan persamaan 3.6 maupun 3.7. Hal tersebut dikarenakan secara statistik data tidak mencukupi untuk diambil standar deviasinya. Oleh karena itu, dalam ACI 318-95 sub bab 5.3.2.2 disebutkan apabila data pengujian kurang 15 sampel, maka nilai kuat tekan riil dari hasil pengujian adalah dihitung berdasarkan tabel 3.2.

**Tabel 3.1 Faktor modifikasi standar deviasi  
(sumber: ACI 318-95, sub bab 5.3.1.2)**

Jumlah data uji	Faktor modifikasi
kurang dari 15	Menggunakan tabel 3.2
15	1,16
20	1,08
25	1,03
Lebih dari 30	1,00

**Tabel 3.2 Kuat tekan hasil pengujian jika data kurang dari 15 sampel**

$f_c'$ spesifikasi	$f_c'$ hasil pengujian, MPa
kurang dari 21	$f_c'r - 7,0$
21 sampai 25	$f_c'r - 8,5$
Lebih dari 35	$f_c'r - 10,0$

Berdasarkan ACI 318M-95 dan ACI 318RM-95 sub bab 5.6.2.3 dilakukan evaluasi secara individual terhadap hasil uji kuat tekan. Mutu beton yang dihasilkan dikatakan memenuhi syarat, apabila :

1. setiap rata-rata dari tiga pasang hasil pengujian berturut-turut (setiap pasang hasil pengujian adalah rata-rata dua silinder) lebih dari atau sama dengan nilai  $f_c'$ ,
2. tidak satupun dari rata-rata dua silinder kurang dari 3,5 MPa dari  $f_c'$ .

Persyaratan di atas memberikan hasil yang dapat diterima dan sesuai untuk semua jenis beton yang digunakan pada perancangan struktur. Jika persyaratan kedua tidak terpenuhi, maka selain memperbaiki adukan beton juga perlu dilakukan uji tidak merusak untuk memastikan daya dukung struktur aktual tidak membahayakan.

Selain diperlukan tercapainya mutu beton yang disyaratkan, keseragam mutu beton juga harus diperhatikan. ACI Committee 363R-92 memberikan kriteria

keseragaman mutu beton bila nilai standar deviasi antara 3,5 sampai 5 MPa. Penilaian terhadap tingkat keseragaman mutu pencampuran beton selain dengan standar deviasi, dapat menggunakan nilai koefisien variasi. Pekerjaan beton di lapangan dianggap baik dengan mutu pencampuran yang seragam, apabila nilai koefisien variasi kurang dari 20% (Suwandojo Siddiq), dihitung dengan persamaan berikut :

$$cv = \frac{Sd}{fc'r} \times 100 \% \quad (3.9)$$

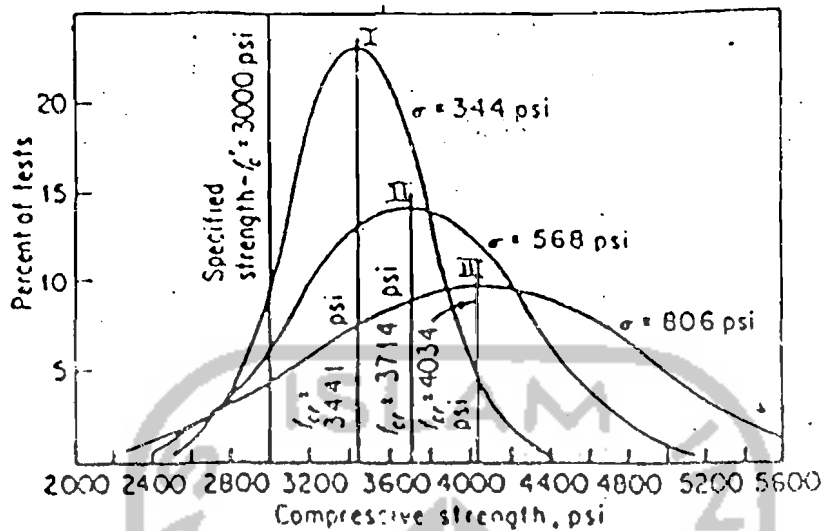
Dengan:

$fc'r$  = kuat tekan beton rata-rata hasil pengujian (MPa)

sd = standar deviasi (MPa)

cv = koefisien variasi (%)

Keseragaman mutu beton yang diproduksi di lapangan menunjukkan pengendalian pelaksanaannya. Semakin baik pengendalian pelaksanaan di lapangan maka mutu beton yang dihasilkan semakin seragam. Pengendalian pelaksanaan yang baik menjadikan pekerjaan beton lebih ekonomis. ACI Standart 214-65, *Evaluation of Compression Test Result of Field Concrete*, memberikan contoh sebuah grafik frekuensi dan kuat tekan rata-rata untuk tingkat pengawasan yang berbeda (gambar 3.1), dengan kuat tekan yang dibutuhkan  $fc' = 3000$  psi ( $1 \text{ psi} = 6,897.10^{-3} \text{ MPa}$ ).



**Gambar 3.1** Grafik frekuensi dan kuat tekan rata-rata  
(Sumber : Nilson, 1991)

Dari gambar di atas diketahui kuat tekan rata-rata dan standar deviasi untuk masing-masing grafik frekuensi kuat tekan. Untuk menentukan pengendalian pelaksanaan berdasarkan tingkat keseragaman kuat tekan beton yang dihasilkan, maka dihitung koefisien variasi dari masing-masing grafik frekuensi kuat tekan. Nilai koefisien variasi dari masing-masing grafik frekuensi di atas adalah sebagai berikut :

1. Grafik I, standar deviasi = 344 psi dan  $f_c'r = 3441$  psi.

$$cv = \frac{sd}{f_c'r} \times 100\% = \frac{344}{3441} \times 100\% = 9,997\%$$

2. Grafik II, standar deviasi = 568 psi dan  $f_c'r = 3714$  psi.

$$cv = \frac{sd}{f_c'r} \times 100\% = \frac{568}{3714} \times 100\% = 15,294\%$$

3. Grafik III, standar deviasi = 806 psi dan  $f_c'r = 4034$  psi.

$$cv = \frac{sd}{f_c'r} \times 100\% = \frac{806}{4034} \times 100\% = 19,98\%$$

Berdasarkan nilai koefisien variasi di atas, nampak pada kasus grafik I memiliki koefisien variasi yang terkecil. Hal ini menunjukkan grafik I memiliki



keseragaman mutu dan pelaksanaan yang paling baik dibanding grafik II dan grafik III. Jika dilihat berdasarkan pencapaian kuat tekan, grafik III adalah yang terbaik karena memiliki kuat tekan rata-rata yang tertinggi, namun keseragamannya rendah sehingga dapat diasumsikan pelaksanaan di lapangan kurang baik. Hal tersebut menunjukkan sifat kondisional, yaitu kondisi pada suatu proyek akan berbeda pada proyek lain. Tingkat keseragaman yang baik belum tentu diikuti oleh tingginya kuat tekan beton yang dihasilkan begitu juga sebaliknya. Oleh karena itu diperlukan pengawasan yang baik terhadap pelaksanaan di lapangan agar diperoleh kuat tekan yang tinggi dengan keseragaman yang baik.

### **3.3.3 Nilai Slump Campuran di Lapangan**

Dalam proses pengerjaan struktur beton, nilai slump merupakan faktor yang penting untuk memenuhi syarat workabilitas beton. Nilai slump berdasarkan beberapa penelitian dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jumlah air yang digunakan dalam campuran, porositas dan kandungan air agregat dan bahan-tambah.

Keseragaman nilai slump beton merupakan syarat agar keseluruhan elemen beton bisa dikerjakan dengan standar pelaksanaan yang sama, terutama untuk elemen-elemen struktur yang mempunyai tingkat kesulitan pengerjaan yang tinggi, misalnya pada kondisi tulangan yang sangat rapat (Supartono, 1998). Permasalahan ketidakseragaman ini diakibatkan oleh faktor produksi seperti penambahan air, bahan tambah, dan kondisi lingkungan. Untuk mengetahui tingkat keseragaman slump, dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$sr = \frac{\sum si}{N} \quad (3.10)$$

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum (si - sr)^2}{N - 1}} \quad (3.11)$$

$$cv = \frac{Sd}{sr} \times 100\% \quad (3.12)$$

Dengan :

sr = slump rata-rata (cm)

si = slump hasil pengujian lapangan (cm)

Sd = standar deviasi (cm)

cv = koefisien variasi (%)

N = jumlah data

### 3.3.4 Modulus Elastisitas

Hubungan tegangan-regangan perlu diketahui untuk menurunkan persamaan analisis dan desain pada struktur beton. Kurva hubungan tegangan-regangan diperoleh dari pengujian terhadap benda uji silinder yang diukur nilai perpendekan terhadap beban yang bekerja. Sampai sekitar 40% dari  $f_c'$ , untuk tujuan praktis penambahan tegangan-regangan yang terjadi dianggap linear. Mendekati 70% tegangan hancur, material kehilangan kekakuannya sehingga menambah ketidaklinearan kurva (Nawy, 1990). Tegangan dan regangan beton dari hasil pengujian dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{tegangan } (\sigma_i) = \frac{p_i}{A} \quad (3.13)$$

$$\text{regangan } (\epsilon_i) = \frac{\Delta L_i}{L_0} \quad (3.14)$$

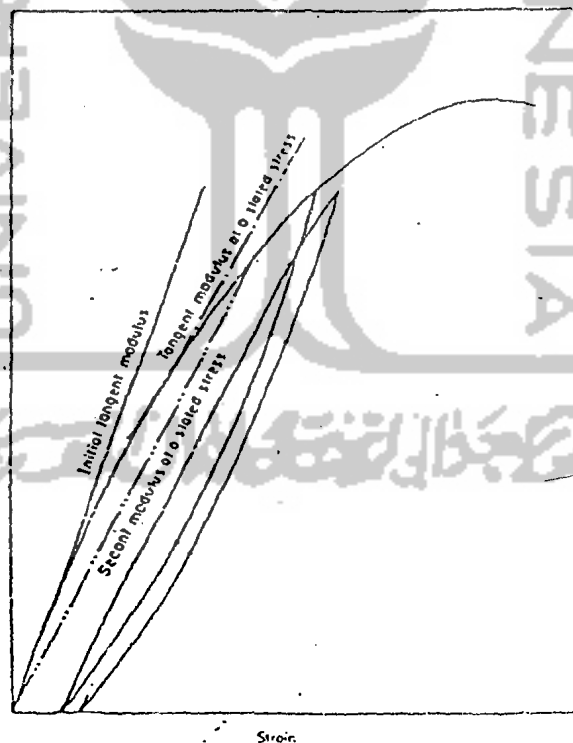
Dengan :

$p_i$  = beban (kg)

$A$  = luas permukaan ( $\text{cm}^2$ )

$\Delta L_i$  = perpendekan (mm)

$L_0$  = panjang awal (mm)



**Gambar 3.2 Pengambilan nilai modulus elastisitas  
(sumber : N. Jackson, 1983)**

Pada gambar 3.2 menunjukkan pengambilan modulus awal, modulus tangen, dan modulus secant dari grafik hubungan tegangan regangan. Modulus awal berpengaruh kecil pada aplikasi struktur, sedangkan tangen modulus sulit untuk ditentukan dan penggunaannya terbatas pada tingkat tegangan tertentu. Nilai modulus secant lebih mudah untuk ditentukan, penggunaannya antara lain pada perhitungan deformasi, defleksi, atau tegangan yang terjadi pada beban kerja (Jackson, 1983). Nilai modulus secant pada suatu harga sekitar  $0,4 f_c'$  diambil sebagai nilai modulus elastisitas, nilai ini memenuhi asumsi praktis bahwa regangan yang terjadi selama pembebanan dapat dianggap elastis, dan regangan lainnya akibat beban dipandang sebagai rangkakan (Nawy, 1985).

Modulus elastisitas dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu karakteristik agregat, umur beton, kondisi rawatan beton, dan metode pengukuran nilai modulus. Karakteristik agregat merupakan faktor yang sangat berpengaruh, penggunaan agregat yang berbutir kecil dengan tekstur yang tajam dapat meningkatkan modulus elastisitas. Modulus elastisitas beton akan meningkat dengan bertambahnya waktu. Peningkatan modulus elastisitas tergantung pada kelangsungan proses hidrasi semen, yang berhubungan dengan berkurangnya porositas beton dan peningkatan kekuatan. Penggunaan bahan-tambah pengganti semen untuk meningkatkan kepadatan beton selain meningkatkan kekuatan juga menaikkan modulus elastisitas beton. Rawatan dengan mempertahankan permukaan beton selalu lembab akan menghasilkan modulus elastisitas beton lebih tinggi 15 % dibanding rawatan kering.

Untuk struktur-struktur khusus seperti pelengkung, terowongan, dan tangki, nilai modulus elastisitas harus ditentukan dari hasil pengujian, hal ini untuk

mendapatkan modulus elastisitas aktual sebagai dasar perhitungan terutama *displacement* dan defleksi akibat tegangan membran (Nawy, 1985).

Modulus elastisitas beton berubah menurut kekuatan, sehingga diambil sebagai perbandingan tegangan terhadap regangan pada 25% sampai 50% dari  $f_c'$  (Wang, 1985). Menurut ASTM C469-65 diambil nilai modulus secant pada nilai 40% dari  $f_c'$  sebagai modulus elastisitas, ACI 318M-95 sub bab 8.5.1 memberikan definisi nilai modulus elastisitas yaitu kemiringan garis yang ditarik dari tegangan bernilai nol sampai tegangan bernilai  $0,45 f_c'$  dari grafik hubungan tegangan-regangan. Modulus elastisitas dari pengujian dihitung dengan persamaan :

$$E_c = \frac{\sigma_{0,45}}{\epsilon_{0,45}} \quad (3.15)$$

Dengan :

$\sigma_{0,45}$  = tegangan (MPa)

$\epsilon_{0,45}$  = regangan (mm/mm)

$E_c$  = modulus elastisitas (MPa)

ACI 318M-95 sub bab 8.5.1 menyatakan bahwa nilai modulus elastisitas ditentukan secara empiris dengan persamaan :

$$E_c = w^{1.5} \times 0,043 \times \sqrt{f_c'} \quad (3.16)$$

$$E_c = 4700 \times \sqrt{f_c'} \quad (3.17)$$

Dengan :

$E_c$  = modulus elastisitas (MPa)       $w$  = berat satuan beton ( $\text{kg/m}^3$ )

$f_c'$  = kuat tekan (MPa).

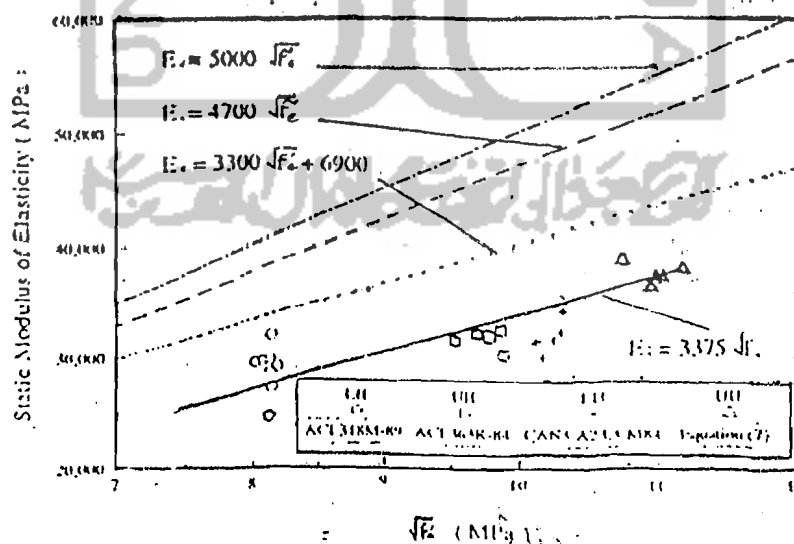
Modulus elastisitas beton hasil pengujian, menurut ACI 318RM-95 sub bab 8.5.1 dipengaruhi oleh agregat dan dapat berbeda dengan nilai pendekatan teoritis. Nilai hasil pengujian umumnya berkisar antara 80% sampai 120% dari nilai pendekatan teoritis.

Dalam peraturan ACI 363R-84, memberikan rekomendasi untuk menghitung nilai modulus elastisitas dengan persamaan pendekatan yaitu :

$$E_c = 3300 \times \sqrt{f_c'} + 6900 \quad \text{untuk } 21 \text{ MPa} < f_c' < 83 \text{ MPa} \quad (3.18)$$

Penyimpangan nilai modulus elastisitas riil terhadap nilai modulus elastisitas pendekatan teoritis untuk beton kinerja tinggi, berdasarkan penelitian Said Iravani (1996), untuk persamaan ACI 363R-84 memberikan nilai toleransi  $\pm 15\%$ .

Perbandingan beberapa persamaan pendekatan teoritis modulus elastisitas, dengan hasil pengujian dapat dilihat pada gambar 3.3 (diambil dari penelitian Said Iravani, 1996).



**Gambar 3.3 Perbandingan modulus elastisitas dengan berbagai metode (sumber: Said Iravani,1996)**

Untuk menentukan penyimpangan modulus elastisitas hasil penelitian terhadap modulus elastisitas dari rumus pendekatan yang ada, digunakan persamaan sebagai berikut :

$$z = \frac{E_{ci} - Y_i}{Y_i} \times 100 \% \quad (3.19)$$

Dengan :

$z$  = selisih antara modulus elastisitas hasil penelitian yang terregresi dengan modulus elastisitas berdasarkan persamaan pendekatan yang digunakan (%)

$E_{ci}$  = modulus elastisitas menurut persamaan pendekatan yang ada (MPa)

$Y_i$  = modulus elastisitas hasil penelitian yang terregresi (MPa)

### 3.3.4 Pelaksanaan dan Pengendalian Mutu

Prosedur pelaksanaan yang tepat dan pengendalian mutu (*quality control*) yang ketat, merupakan kunci keberhasilan pelaksanaan beton kinerja tinggi (Supartono, 1998).

#### 1. Pemilihan material

Mutu dan keseragaman material pembentuk beton, merupakan suatu kriteria penting bagi keberhasilan produksi beton kinerja tinggi. Untuk mencapai kinerja beton yang diharapkan memerlukan material yang baik seperti yang disyaratkan. Perubahan mutu dan keseragaman material dapat mengakibatkan perubahan campuran beton, sehingga diperlukan jaminan pengadaan material dari sumber yang sama dari awal hingga akhir proyek.

## 2. Perancangan campuran beton dan penyesuaian

Perancangan campuran beton (*mix design*) dapat menggunakan berbagai peraturan atau metode yang ada. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah menurut ACI (*American Concrete Institute*), yang memperhatikan nilai ekonomis, bahan yang tersedia, kemudahan pekerjaan, keawetan, dan kekuatan. Langkah-langkah perhitungan campuran yang dilakukan yaitu :

1. menentukan target kuat tekan rata-rata,

$$f_{c'r} = f_{c'} + k.s$$

Dengan:

$f_{c'}$  = kuat tekan yang disyaratkan

$k$  = tetapan statistik, Indonesia memakai 5% kegagalan dengan faktor  $k = 1,64$

$s$  = deviasi standar rencana yang besarnya didasarkan nilai yang diperoleh dari pengalaman memproduksi beton. Bila tidak tersedia data nilai  $s$ , maka diambil nilai tambah = 12 MPa

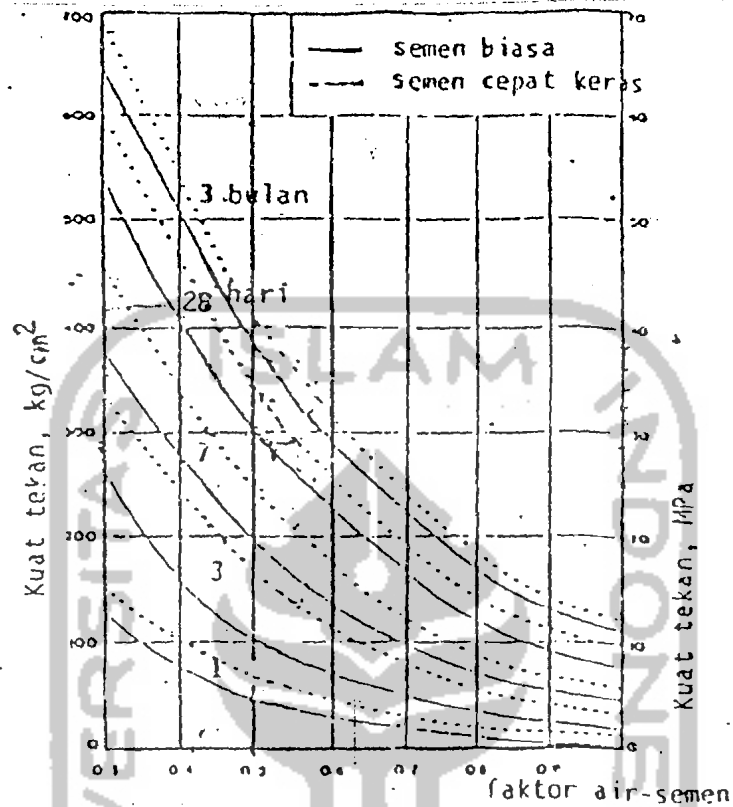
2. menentukan kebutuhan air,

**Tabel 3.3 Perkiraan kebutuhan air berdasarkan slump dan ukuran maksimum agregat**

Slump, mm	Ukuran maksimum agregat, mm		
	10	20	40
25 – 50	206	182	162
75 – 100	226	203	177
150 – 175	240	212	188
Udara terperangkap	3 %	2 %	1 %



3. menentukan faktor air-semen,



Gambar 3.4 Kurva hubungan kuat tekan dan faktor air-semen

4. menentukan kadar semen dan *silica fume*,
5. menentukan proporsi agregat,

Tabel 3.4 Perkiraan kebutuhan agregat kasar berdasarkan ukuran maksimum agregat dan modulus kehalusan butir

Ukuran maksimum agregat, mm	Modulus halus butir agregat halus			
	2,4	2,6	2,8	3,0
10	0,46	0,44	0,42	0,40
20	0,65	0,63	0,61	0,59
40	0,76	0,74	0,72	0,70
80	0,84	0,82	0,80	0,78
150	0,90	0,88	0,86	0,84

6. menentukan berat satuan beton per meter kubik

**Tabel 3.5 Perkiraan berat satuan beton per meter kubik**

Ukuran maksimum agregat (mm)	Berat satuan beton segar ( $\text{kg/m}^3$ )	
	Beton non-air-entrained	Beton air-entrained
10	2274	2185
12	2304	2227
19	2345	2274
25	2375	2310
38	2410	2345
50	2340	2369
76	2464	2393
150	2505	2340

7. menentukan dosis *superplasticizer*.

Perubahan kondisi di lapangan baik kondisi alam maupun material, memungkinkan terjadinya penyesuaian terhadap *mix design* yang telah ditetapkan sebelumnya. Hal ini dilakukan untuk menjamin tercapainya kinerja beton seperti yang disyaratkan.

### 3. Pelaksanaan produksi beton (*batching and mixing*)

Penakaran (*batching*) material harus dilakukan secara tepat dan konsisten mengikuti hasil rancangan campuran beton yang sudah ada terutama komponen material yang memerlukan dosis yang tepat seperti semen, bahan tambah, dan air. Campuran beton yang homogen diperoleh dengan pengisian dan pengadukan bahan yang baik. Untuk menghasilkan beton dengan kinerja yang baik maka perlu ditetapkan suatu prosedur pencampuran yang seharusnya diikuti dalam pelaksanaan. Prosedur pencampuran tersebut meliputi (dikutip dari Parka, 2000) :

1. drum dibasahi,
2. dimasukkan air  $\pm 60\%$  dari *mix design*,
3. *superplasticizer*  $\pm 50\%$  dari *mix design*,
4. dimasukkan batu pecah  $\pm 40-50\%$  dari *mix design*,
5. dimasukkan *silica fume* 100%,
6. diaduk 2 menit sampai semua bahan tercampur,
7. dimasukkan semen 100%,
8. dimasukkan 50 % batu pecah dari *mix design*,
9. diaduk 2 menit,
10. dimasukkan pasir, sisa air dan *superplasticizer*,
11. diaduk 2 menit.

Apabila pengecoran dihentikan untuk waktu yang lama (lebih dari 24 jam) maka :

1. pada beton yang sudah dicor permukaannya dikasarkan,
2. acuan bagian terakhir yang sudah dicor dilubangi agar tidak terjadi genangan saat hujan,
3. pada pengecoran pertama, nilai slump beton sekitar 12 cm,
4. pemadatan diperlama agar dapat lebih padat dan pada bagian sambungan beton lama dan baru dilapisi *bounding agent*.

#### **4. Pengangkutan dan pengecoran beton**

Bahaya yang timbul selama pengangkutan adalah segregasi, yaitu pemisahan bahan campuran beton yang disebabkan oleh ukuran partikel dari berat jenis yang berbeda, dan penurunan kelecakan beton. Kedua hal tersebut dapat mengakibatkan

penurunan beberapa kinerja beton seperti berkurangnya workabilitas, turunnya kuat tekan beton akibat berkurangnya kepadatan beton, dan berkurangnya kekedapan beton terhadap korosi. Oleh karena itu, sebaiknya tidak digunakan beberapa cara pengangkutan seperti saluran curam atau ban-ban pengangkut dan digantikan dengan metode yang dapat mengurangi kecenderungan pemisahan sekecil-kecilnya, misalnya dengan menggunakan *lift*.

Pada saat pengecoran adukan beton harus dituang secara terus-menerus untuk menghindari hubungan yang buruk pada lapisan pengecoran. Penuangan adukan tidak boleh dijatuhkan dari ketinggian lebih dari satu meter untuk menghindari terjadinya pemisahan antar material, selain itu harus dijaga agar acuan tidak bergeser.

Pemadatan diperlukan untuk memastikan kontak yang baik dengan baja dan mencegah terjadinya keropos (Nilson, 1993). Pemadatan dapat dilakukan dengan bantuan alat pemadat getar (*vibrator*), namun penggetaran terlalu lama dapat menyebabkan terjadinya pemisahan.

#### **5. Koordinasi operasional**

Faktor lain yang penting untuk menjamin keberhasilan pelaksanaan beton kinerja tinggi adalah adanya komunikasi yang baik antara *supplier*, kontraktor pelaksana dan konsultan pengawas, agar dapat berkoordinasi dengan baik terutama untuk koordinasi tetap tersedianya material yang mempunyai mutu dan keseragaman yang sama selama pelaksanaan pekerjaan.

## 6. Rawatan

FIP (*Federation Internationale de la Precontrainte*) menyebutkan bahwa rawatan dengan suhu sekitar 50° C untuk beton dengan kandungan *silica fume*, akan mendapatkan kekuatan awal yang memadai. Carrasquillo, 1981 menyatakan bahwa rawatan dengan membasahi selama 7 hari akan mengurangi kekuatan beton, sekitar 0,88 – 0,91 dari kekuatan benda uji dengan rawatan untuk waktu 28 hari. Cara rawatan yang biasa digunakan adalah menempatkan beton dalam air atau ruangan yang lembab, menyelimuti permukaan dengan karung basah, menggenangi permukaan dengan air, dan menyiram permukaan secara terus menerus (Murdock, 1979).

