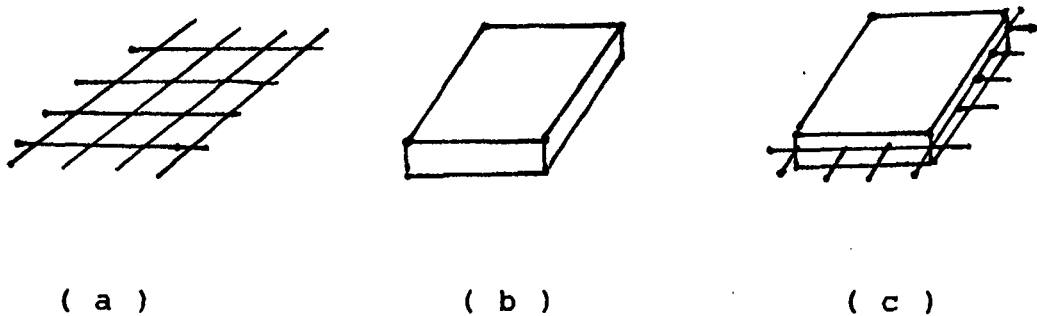


## V. SIFAT DAN KARAKTERISTIK FERROCEMENT

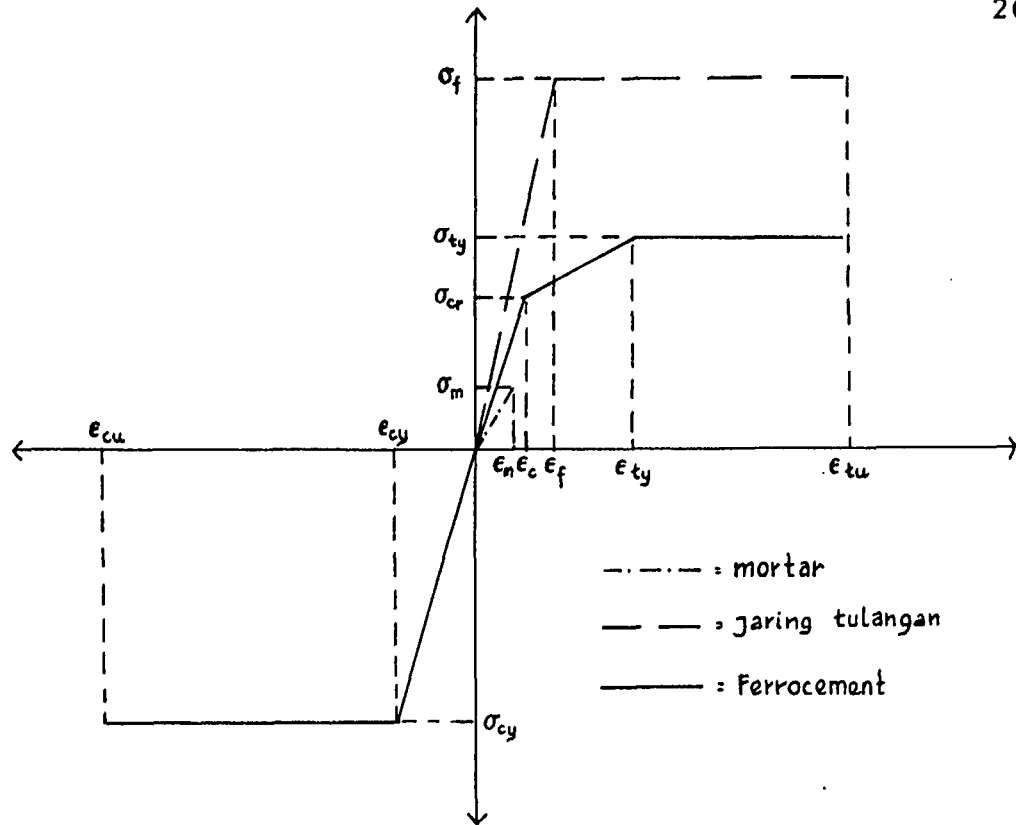
Ferrocement sebagai material komposit memiliki kekuatan dan modulus elastisitas yang lebih baik dari masing-masing unsur penyusunnya. Prinsip dasarnya sebagai berikut:



Gb. 7 : Unsur-unsur penyusun ferrocement.

- (a). Jaring tulangan, memiliki kekuatan dan modulus elastisitas yang tinggi.
- (b). Spesi semen, memiliki daya rekat yang baik, mudah dibuat dan dikerjakan.
- (c). Komposit, memiliki kekuatan dan modulus elastisitas yang lebih baik dari spesi semen.

Untuk memperjelas pernyataan diatas, perhatikan idealisasi diagram tegangan-regangan unsur-unsur penyusun ferrocement dan ferrocement akibat beban tarik dan tekan pada grafik 3.

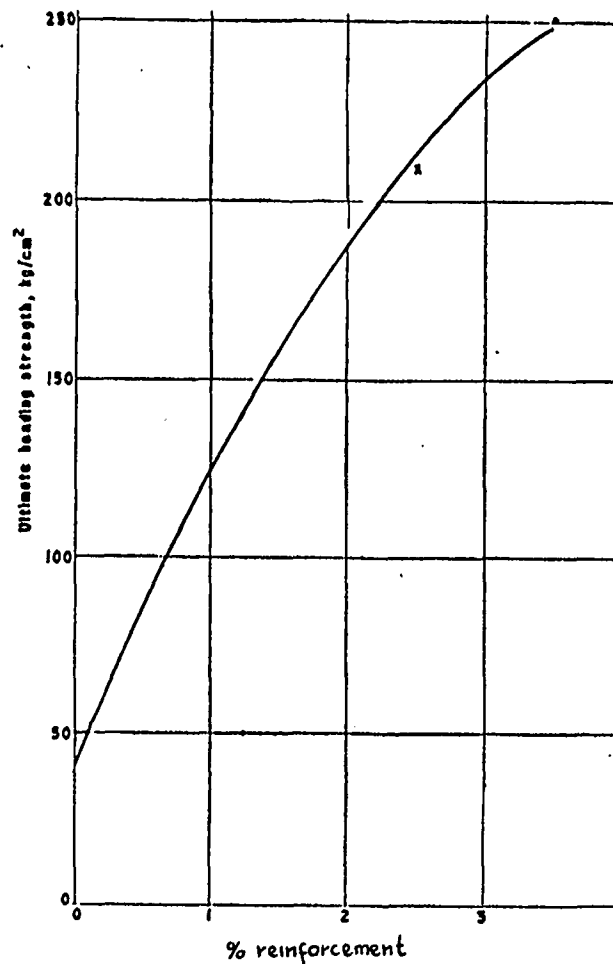


Grafik 3: Idealisasi diagram tegangan-regangan

Dua parameter jaring tulangan yang sering digunakan dalam analisa ferrocement adalah :

- a. Volume fraction jaring tulangan ( $v_f$ )
- b. Spesific surface jaring tulangan ( $S_r$ )

Volume fraction jaring tulangan adalah volume total jaring tulangan dibanding volume komposit (jaring tulangan + mortar). Pada ferrocement, nilai volume fraction jaring tulangan berkisar antara 1% - 8% [19]. Dari hasil percobaan Kamasundara, R. A., dan Kallapa, G. C. S., [22] ternyata bahwa nilai volume fraction jaring tulangan yang lebih besar dari 2,5% tidak ekonomis lagi, karena penambahan volume tulangan hanya menimbulkan kenaikan kapasitas momen yang kecil. Hal ini dapat dilihat pada grafik 4 berikut ini. Nilai minimum volume fraction jaring tulangan dalam arah beban ialah  $v_L = \sigma_{cr}/\sigma_{fu}$ .



Grafik. 4. Pengaruh volume fraction tulangan pada kenaikan kapasitas momen.

Spesific surface jaring tulangan adalah total luas rekatan jaring tulangan dibanding volume komposit. Nilai spesifik surface jaring tulangan mempengaruhi besarnya tegangan retak awal [27]. Dengan volume tulangan yang sama jaring tulangan yang berdiameter lebih kecil memiliki kapasitas momen yang lebih besar karena spesifik surface jaring tulangannya lebih besar.

## 1. TEGANGAN TARIK

### 1. 1. Daerah elastis

Pada daerah yang masih elastis berlaku anggapan-anggapan sebagai berikut [19] :

- Penulangan tersebar merata
- Tidak terjadi slip antara tulangan dan spesi

Sifat elastisitasnya dipengaruhi oleh tipe, orientasi, sifat mekanis dari jaring penulangan.

Sehingga beban total yang diterima oleh tulangan dan spesi :

$$P_t = P_m + P_f \quad (5.1)$$

$$\sigma_t A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \quad (5.2)$$

$$\sigma_t = \sigma_m v_m + \sigma_f v_f \quad (5.3)$$

Sedangkan :

$$v_m = \frac{A_m \text{ 1 unit panjang}}{A_c \text{ 1 unit panjang}}$$

$$v_f = \frac{A_f \text{ 1 unit panjang}}{A_c \text{ 1 unit panjang}}$$

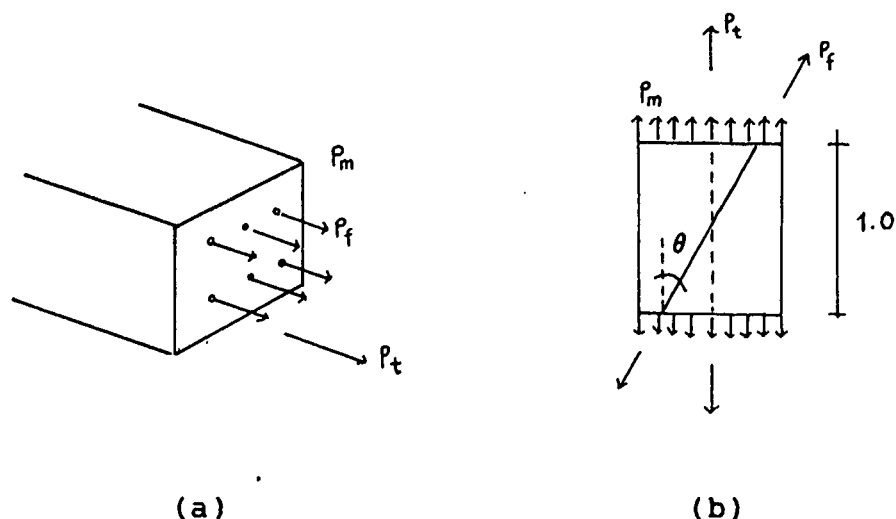
Untuk orientasi penulangan yang menyudut terhadap arah beban diberikan faktor :

$$F = \cos \theta$$

dimana :  $\theta$  = sudut antara arah beban dan penulangan.

Sehingga diperoleh :

$$\sigma_t = \sigma_m v_m + F \sigma_f v_f \quad (5.4)$$



Gb. 8 : Pembagian gaya pada struktur ferrocement

Dengan memperhitungkan faktor efisiensi panjang dan orientasi dalam arah ruang dari tulangan diperoleh [16,17] :

$$\sigma_t = \sigma_m v_m + \sigma_f v_{fe} \quad (5.5)$$

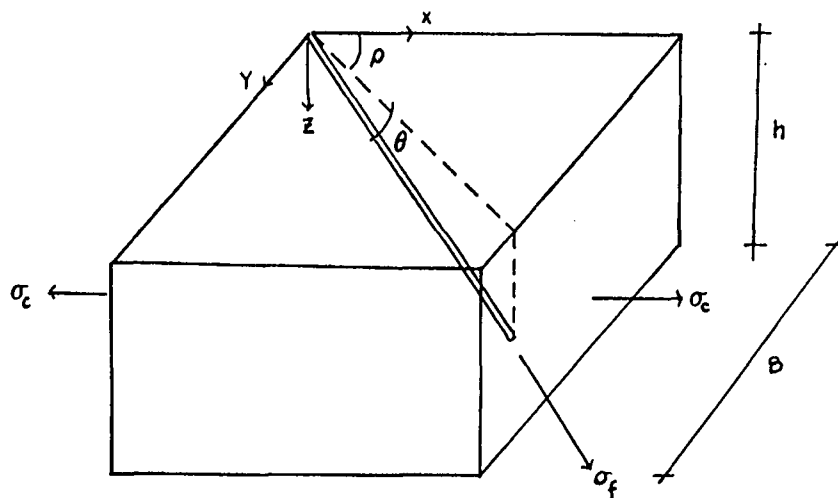
sedangkan :

$$v_{fe} = \mu F_2 v_f$$

$$F_2 = \frac{1}{16 \rho \theta} (2 \rho + \sin 2 \rho) (2 \theta + \sin 2 \theta)$$

$$\mu = 1 - l_c/2l$$

$$l_c = \sigma_{fu} d/2 \tau_u$$



Gambar 9 : Orientasi tulangan dalam ruang

dimana:  $P_t$  = beban total komposit

$P_m$  = beban pada spesi

$P_f$  = beban pada tulangan

$\sigma_t$  = tegangan total komposit

$\sigma_m$  = tegangan pada spesi

$\sigma_f$  = tegangan pada tulangan

$A_m$  = luas permukaan spesi saja

$A_f$  = luas permukaan tulangan

$A_c$  = luas permukaan bagian komposit

$v_f$  = volume fraction tulang

$v_m$  = volume fraction spesi

$\mu$  = faktor efisiensi panjang tulang

$v_{fe}$  = volume fraction efektif

$\rho = \sin^{-1} (B/l)$

$\theta = \sin^{-1} (h/l)$

$B$  = lebar penampang

$h$  = tinggi penampang

$l$  = panjang tulang

$l_c$  = panjang kritis tulang

$\sigma_{fu}$  = tegangan batas tulang

Perumusan (5. 4) memberikan faktor koreksi untuk orientasi penulangan terhadap beban dalam bidang. Perumusan (5. 5) memberikan faktor koreksi untuk orientasi penulangan terhadap beban dalam ruang dan faktor efisiensi panjang tulang akibat distribusi tegangan yang tidak merata sepanjang tulang. Faktor koreksi untuk orientasi penulangan terhadap beban dalam ruang kurang berarti, karena dalam pelaksanaannya penempatan tulang selalu dalam bidang. Sedang faktor efisiensi panjang tulang perlu diperhatikan untuk memperoleh hasil yang tepat.

Dengan pertimbangan diatas, diambil perumusan :

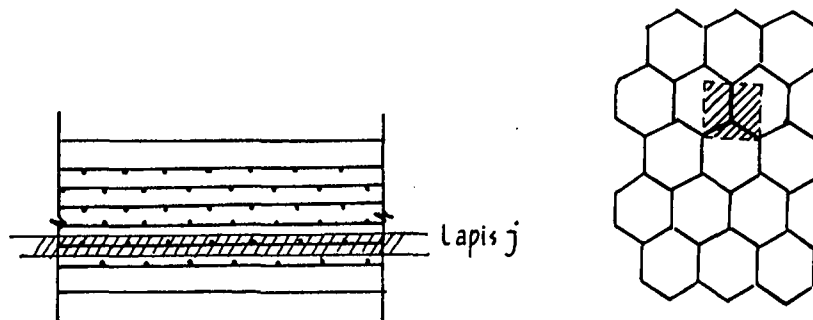
$$\sigma_t = \sigma_m v_m + F \mu \sigma_f v_f \quad (5. 6)$$

Untuk per unit luas dan  $N$  tipe tulang :

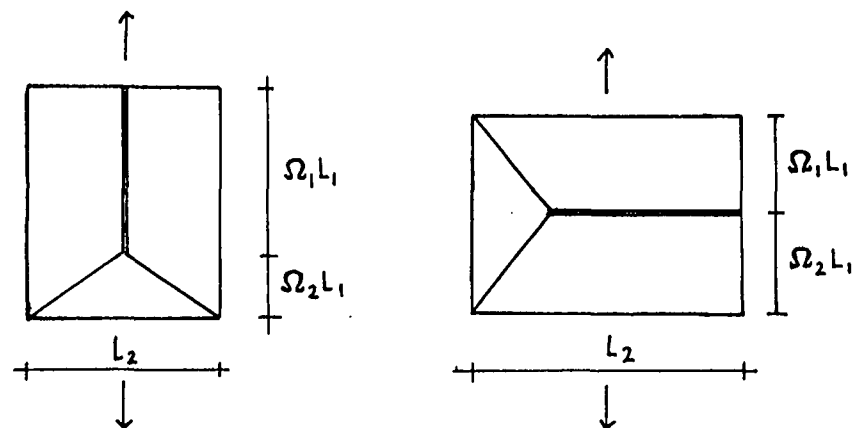
$$\sigma_t = \sigma_m A_m + \sum_{i=1}^N F_i \mu \sigma_{fi} A_{fi} \quad (5. 7)$$

Karena panjang tulang untuk 1 unit panjang =  $\frac{1}{\cos \theta}$

$$\text{maka: } \sigma_t = \sigma_m v_m + \sum_{i=1}^N F_i^2 \mu \sigma_{fi} v_{fi} \quad (5.8)$$



Gb. 10 : Potongan tulangan kawat ayam



Gb. 11 : Detail tulangan kawat ayam

Untuk tulangan anyaman segi-enam yang berlapis-lapis dipakai parameter-parameter :

- $\Omega_{1j}$  dan  $\Omega_{2j}$  yaitu faktor perbandingan panjang bagian atas dan bawah dari lapis ke  $j$ .

- $\alpha_{1ij}$  dan  $\alpha_{2ij}$ , dimana  $\alpha_{1ij} = \frac{A_{1ij} \Omega_{ij}}{F_{1ij} V_{fj}}$

$V_{fj}$  = volume tulangan lapis  $j$

$F_{1ij}$  = Cosinus sudut antara tulangan  $i$  dan arah beban

Perumusan diatas menjadi :

$$\sigma_{t1j} A_{cj} = \sigma_{m1j} A_{m1j} + \sum_{i=1}^N F_{1ij} \mu \sigma_{1ij} A_{1ij} \quad (5.9)$$

Dengan mengalikan kedua ruas dengan  $\Omega_{1j}$  dan memasukkan faktor  $\alpha_{1ij}$ , maka :

$$\Omega_{1j} \sigma_{t1j} A_{cj} = \sigma_{m1j} A_{m1j} \Omega_{1j} + \sum_{i=1}^N F_{1ij} \mu \sigma_{1ij} A_{1ij} \Omega_{1ij}$$

$$\cdot \frac{F_{1ij} V_{fj}}{F_{1ij} V_{fj}}$$

$$\Omega_{1j} \sigma_{t1j} A_{cj} = \sigma_{m1j} A_{m1j} \Omega_{1j} + V_{fj} \sum_{i=1}^N F_{1ij}^2 \mu \sigma_{1ij} \alpha_{1ij}$$

$$\sigma_{t1j} = \sigma_{m1j} \frac{A_{m1j} \Omega_{1j}}{A_{cj} \Omega_{1j}} + \frac{V_{fj}}{A_{cj} \Omega_{1j}} \sum_{i=1}^N F_{1ij}^2 \mu \sigma_{1ij} \alpha_{1ij}$$

$$\sigma_{t1j} = \sigma_{m1j} v_{m1j} + \frac{V_{fj}}{\Omega_{1j}} \sum_{i=1}^N F_{1ij}^2 \mu \sigma_{1ij} \alpha_{1ij} \quad (5.10)$$

$$\sigma_{t2j} = \sigma_{m2j} v_{m2j} + \frac{V_{fj}}{\Omega_{2j}} \sum_{i=1}^N F_{2ij}^2 \mu \sigma_{2ij} \alpha_{2ij} \quad (5.11)$$

Notasi 1 menunjukkan bagian atas, 2 menunjukkan bagian bawah. Dari kedua nilai ini dipilih yang paling menentukan.

## 1. 2. Daerah retak

Daerah retak dapat dibagi menjadi :

- Retak awal (First / Primary Crack)
- Retak (Crack)

Pada retak awal dipakai anggapan :

- Mulai timbul slip antara tulangan dan spesi

Sedangkan pada retak dipakai anggapan :

- Telah terjadi slip yang besar

- Pada permukaan spesi yang retak tidak terdapat tegangan
- Seluruh beban dipikul oleh penulangannya
- Panjang retak tetap, tetapi lebar retak bertambah sesuai dengan pertambahan tegangan tarik pada penulangannya

Besarnya tegangan pada retak awal diperoleh dengan substitusi  $\sigma_t$  dengan  $\sigma_{cr}$  dan  $\sigma_m$  dengan  $\sigma_{mu}$  pada persamaan (5. 8), hingga didapat :

$$\sigma_{cr} = \sigma_{mu} v_m + \frac{N}{\sum_{i=1}^N F_i}^2 \mu \sigma_{fi}^* v_{fi} \quad (5. 12)$$

dimana :  $\sigma_{mu}$  = kekuatan batas spesi terhadap tarikan

$\sigma_{fi}^*$  = tegangan pada tulangan saat spesi retak

Dari hasil percobaan Naaman dan Shah, tegangan pada retak awal adalah merupakan fungsi dari specific surface reinforcement. Rumus empiris yang diperoleh adalah :

$$\sigma_{cr} = 140 S_L + \sigma_{mu} \text{ psi} \quad (5. 13)$$

$$\sigma_{cr} = 24,52 S_L + \sigma_{mu} \text{ kg/cm}^2 \quad (5. 14)$$

dimana :  $S_L$  = specific surface reinforcement dalam arah beban

Perumusan secara empiris lebih sederhana dan mudah dipakai, sedangkan untuk mendapatkan harga  $\sigma_{fi}^*$  diperlukan langkah-langkah sebagai berikut :

- Ditentukan/diketahui tegangan ijin tarik spesi  $\sigma_{mu}$
- Dicari regangan tarik  $\epsilon_{mu} = \sigma_{mu}/E_m$
- Perpanjangan spesi = perpanjangan tulangan, maka tegangan tulangan pada saat spesi retak :

$$\sigma_{fi}^* = \epsilon_{mu} E_t$$

### 1. 3. Daerah beban batas

Kekuatan batas untuk tegangan tarik dari komposit merupakan kekuatan batas dari penulangannya saja, sehingga spesi tidak memberikan sumbangan kekuatan, maka dari perumusan (5. 8) didapat :

$$\sigma_{tu} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N F_i} \mu \sigma_{fi} v_{fi} \quad (5.15)$$

Untuk segmen yang berlapis-lapis, bagian atas :

$$\sigma_{tu1j} = \frac{v_{fj}}{\Omega_{1j}} \frac{N}{\sum_{i=1}^N F_{1ij}} \mu \sigma_{(1ij)u} \alpha_{1ij} \quad (5.16)$$

Untuk bagian bawah :

$$\sigma_{tu2j} = \frac{v_{fj}}{\Omega_{2j}} \frac{N}{\sum_{i=1}^N F_{2ij}} \mu \sigma_{(2ij)u} \alpha_{2ij} \quad (5.17)$$

Dari kedua nilai diatas, nilai yang terkecil yang menentukan.

## 2. TEGANGAN TEKAN

### 2. 1. Daerah elastis

Dengan penurunan rumus yang sama dengan tarik maka didapat, untuk bagian atas :

$$\sigma_{c1j} = \sigma_{m1j} v_{m1j} + \frac{v_{fj}}{\Omega_{1j}} \frac{N}{\sum_{i=1}^N F_{1ij}} \mu \sigma_{1ij} \alpha_{1ij} \quad (5.18)$$

Untuk bagian bawah :

$$\sigma_{c2j} = \sigma_{m2j} v_{m2j} + \frac{v_{fj}}{\Omega_{2j}} \frac{N}{\sum_{i=1}^N F_{2ij}} \mu \sigma_{2ij} \alpha_{2ij} \quad (5.19)$$

Dari kedua nilai diatas, nilai terkecil yang menentukan

### 2. 2. Daerah beban batas

Kekuatan batas dari tegangan tekan ditentukan

dengan mengabaikan kekuatan tulangan yang telah tertekuk, jadi hanya memperhatikan kekuatan dari spesinya saja. Dari beberapa percobaan Sutharatanachaiyaporn dan Pama [19] diperoleh bahwa tegangan tekan batas dari ferrocement lebih rendah dari tegangan batas spesi semen saja, sehingga dirumuskan, untuk bagian atas :

$$\sigma_{cu1j} = 0,85 f_c' v_{m1j} \quad (5. 20)$$

Untuk bagian bawah :

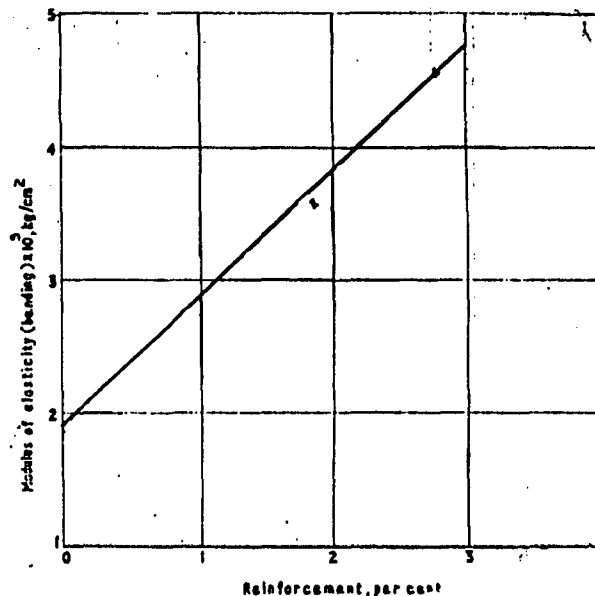
$$\sigma_{cu2j} = 0,85 f_c' v_{m2j} \quad (5. 21)$$

dimana :  $f_c'$  = kekuatan tekan batas dari spesi semen

Dari kedua nilai diatas, nilai terkecil yang menentukan

### 3. MODULUS ELASTISITAS

Modulus elastisitas ferrocement bergantung pada unsur unsur penyusunnya. Berdasarkan penelitian Kamasundara dan Kallapa [22] modulus elastisitas ferrocement berbanding lurus dengan pertambahan volume jaring tulangan. Hal ini dapat dilihat pada grafik 5 dibawah ini.



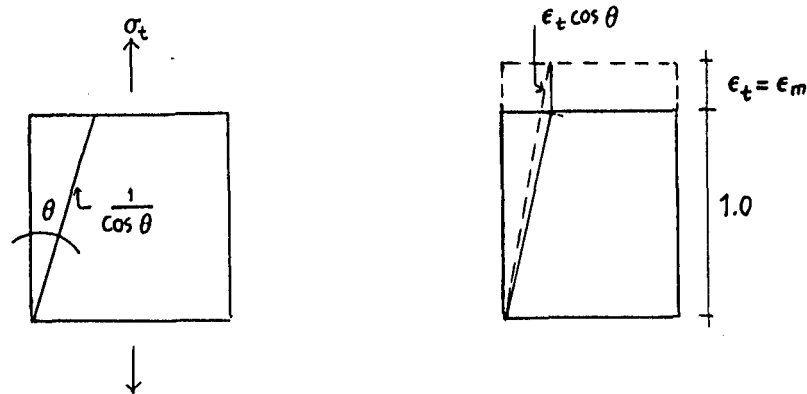
Grafik 5. Pengaruh volume tulangan pada modulus elastisitas

### 3. 1. Pada tegangan tarik

#### Daerah elastis.

Karena tidak terjadi slip maka regangan pada spesi semen sama dengan regangan kompositnya. Besarnya regangan pada jaring tulangan :

$$\epsilon_i = \frac{1}{1} = \frac{\epsilon_t \cos \theta}{\cos \theta} = \frac{\epsilon_t F_i}{1} = F_i^2 \epsilon_t$$



Gb. 12 : Regangan jaring tulangan dalam spesi semen

Dengan berdasarkan hukum Hook dari persamaan (5. 8)

diperoleh :

$$E_t \epsilon_t = E_m \epsilon_m \nu_m + \sum_{i=1}^N F_i^2 \mu E_{fi} \epsilon_{fi} \nu_{fi}$$

dimana :  $\epsilon_m = \epsilon_t$

$$E_t = E_m \nu_m + \sum_{i=1}^N F_i^2 \mu E_{fi} \frac{\epsilon_{fi}}{\epsilon_t} \nu_{fi}$$

$$E_t = E_m \nu_m + \sum_{i=1}^N F_i^4 \mu E_{fi} \nu_{fi} \quad (5. 22)$$

Untuk jaring kawat ayam yang berlapis-lapis, bagian atas :

$$E_{t1j} = E_{m1j} \nu_{m1j} + \frac{\nu_{f1}}{\alpha_{1j}} \sum_{i=1}^N F_{1ij}^4 \mu E_{1ij} \alpha_{1ij} \quad (5.23)$$

Untuk bagian bawah :

$$E_{t2j} = E_{m2j} v_{m2j} + \frac{v_{fi}}{\Omega_{2j}} \sum_{i=1}^N F_{1ij}^4 \mu E_{2ij} \alpha_{2ij} \quad (5.24)$$

Karena untuk jaring tulangan sejenis, modulus elastisitas tulangan adalah sama untuk bagian atas dan bawah, demikian pula modulus elastisitas spesinya.

Bentuk perumusan ini disederhanakan menjadi :

$$E_{t1j} = E_m v_{m1j} + E_{fj} v_{fj} \eta_{1j} \mu \quad (5.25)$$

$$E_{t2j} = E_m v_{m2j} + E_{fj} v_{fj} \eta_{2j} \quad (5.26)$$

Sedangkan :

$$\eta_{1j} = \frac{1}{\Omega_{1j}} \sum_{i=1}^N F_{1ij}^4 \alpha_{1ij} \quad (5.27)$$

$$\eta_{2j} = \frac{1}{\Omega_{2j}} \sum_{i=1}^N F_{2ij}^4 \alpha_{2ij} \quad (5.28)$$

dimana :  $\eta$  = faktor efektifitas dari jaring tulangan

Modulus elastisitas total untuk lapis ke j adalah :

$$\frac{1}{E_{tj}} = \frac{\Omega_{1j}}{E_{t1j}} + \frac{\Omega_{2j}}{E_{t2j}}$$

$$E_{tj} = \frac{E_{t1j}}{\Omega_{1j} + \Omega_{2j} \frac{E_{t1j}}{E_{t2j}}} \quad (5.29)$$

Untuk penampang yang berisi jaring tulangan yang berbeda type, orientasi, dan sifat mekanisnya, modulus elastisitas totalnya adalah :

$$E_t = \frac{\sum_{j=1}^N E_{tj} n_j A_{cj}}{\sum_{j=1}^N A_{cj}} \quad (5. 30)$$

dimana:  $n_j$  = jumlah lapis dari jaring tulangan type  $j$

$A_{cj}$  = luasan komposit dari lapis ke  $j$

$N$  = jumlah dari type jaring tulangan yang dipakai

Dari hasil percobaan oleh Naaman dan Shah [19] diperoleh rumus empiris sebagai berikut :

$$E_t = E_m + E_{RL} V_L \quad (5. 31)$$

dimana :  $V_L$  = volume total tulangan dalam arah beban

Volume spesi diambil satu satuan volume

Sesudah retak awal perumusan itu menjadi :

$$E_t = E_{RL} V_L \quad (5. 32)$$

#### Daerah retak

Modulus elastisitas ferrocement di daerah retak ialah :

$$E_{cr} = \frac{\sigma_{ty} - \sigma_{cr}}{\epsilon_{ty} - \epsilon_{cr}} \quad (5. 33)$$

sedangkan :

$$\epsilon_{cr} = \frac{\sigma_{cr}}{E_t} \quad (5. 34)$$

$$\epsilon_{ty} = \frac{1}{E_f} \left[ \sigma_{fy} - \frac{\sigma_{mu}}{2} \frac{v_m}{v_f} \right] \quad (5. 35)$$

dimana :  $\sigma_{fy}$  = tegangan leleh tulangan

$\sigma_{mu}$  = tegangan batas mortar

### 3. 2. Pada tegangan tekan

#### Daerah elastis

Modulus elastisitas untuk jaring kawat yang berlapis, bagian atas :

$$E_{c1j} = E_{m1j} \nu_{m1j} + \frac{\nu_{fj}}{\Omega_{1j}} \sum_{i=1}^N F_{1ij}^4 \mu E_{1ij} \alpha_{1ij} \quad (5.36)$$

bagian bawah :

$$E_{c2j} = E_{m2j} \nu_{m2j} + \frac{\nu_{fj}}{\Omega_{2j}} \sum_{i=1}^N F_{2ij}^4 \mu E_{2ij} \alpha_{2ij} \quad (5.37)$$

Modulus elastisitas total untuk lapis ke j :

$$E_{cj} = \frac{E_{c1j}}{\Omega_{1j} + \Omega_{2j} \frac{E_{c1j}}{E_{c2j}}} \quad (5.38)$$

Modulus elastisitas total dari potongan melintang berisi jaringan tulangan yang berbeda jenis, orientasi, dan sifat mekanisnya adalah :

$$E_c = \frac{\sum_{j=1}^N E_{cj} n_j A_{cj}}{\sum_{i=1}^N A_{cj}} \quad (5.39)$$

### 4. TEGANGAN LENTUR

Asumsi-asumsi yang dipakai dalam penurunan rumus untuk tegangan lentur adalah [8,14,18,19,20] :

1. Potongan normal yang sebelum pembebanan adalah bidang datar tetap datar selama dan sesudah pembebanan.
2. Regangan terdistribusi linier sepanjang tinggi penampang untuk semua tahap pembebanan.

3. Tegangan sebanding dengan regangan.
4. Defleksi dan deformasi yang kecil akibat geser diabaikan
5. Diagram tegangan-regangan diidealisasikan pada gambar 12
  - \* elastis - plastis untuk tekan
  - \* tri-linier untuk tarik

Beberapa kasus yang akan ditinjau pada pembahasan tegangan lentur ferrocement adalah :

kasus 1 : Penampang komposit dalam daerah tidak retak

$$( 0 \leq \epsilon_t \leq \epsilon_{cr} , 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cy} )$$

kasus 2 : Penampang bagian tarik dalam daerah retak dan bagian tekan dalam daerah elastis.

$$( \epsilon_{cr} \leq \epsilon_t \leq \epsilon_{ty} , 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cy} )$$

kasus 3a : Penampang bagian tarik dalam daerah retak dan bagian tekan dalam daerah plastis.

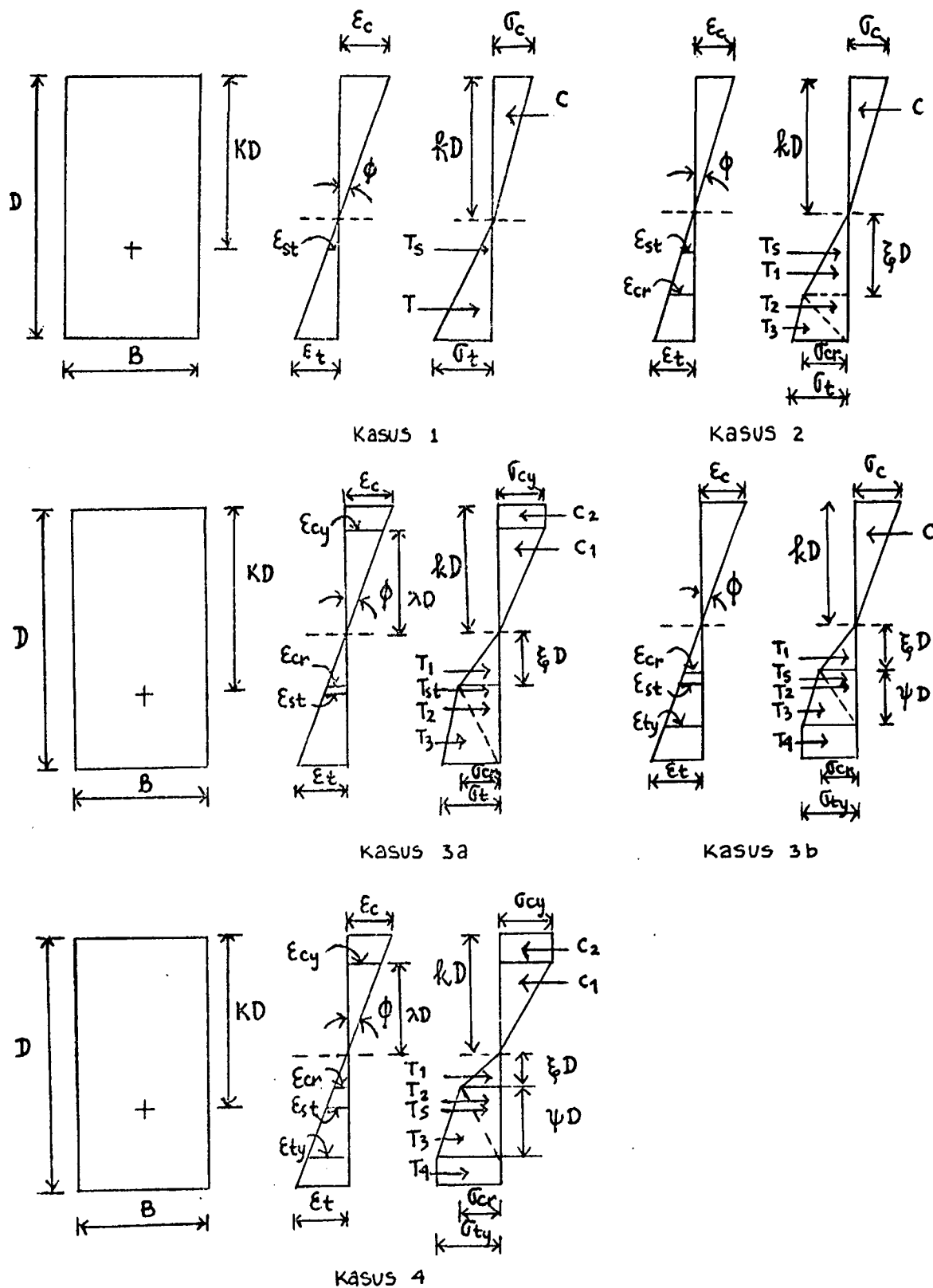
$$( \epsilon_{cr} \leq \epsilon_t \leq \epsilon_{ty} , \epsilon_{cy} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} )$$

kasus 3b : Penampang bagian tarik dalam daerah leleh dan bagian tekan dalam daerah elastis.

$$( \epsilon_{ty} \leq \epsilon_t \leq \epsilon_{cu} , 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cy} )$$

kasus 4 : Penampang bagian tarik dan tekan berada dalam daerah leleh.

$$( \epsilon_{ty} \leq \epsilon_t \leq \epsilon_{tu} , \epsilon_{cy} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} )$$



Gb. 13 : Diagram tegangan-regangan ferrocement akibat lentur

#### 4. 1. Kasus 1: Penampang komposit dalam daerah tidak retak

Tanpa tulangan rangka

$$C = 1/2 E_c \epsilon_c k D B \quad (5. 40)$$

$$T = 1/2 E_t \epsilon_t (1 - k) D B \quad (5. 41)$$

Terjadi kesetimbangan gaya dan momen :

$$C = T \quad (5. 42)$$

$$M = 2/3 [T (1 - k) + C k] D \quad (5. 43)$$

Besarnya curvature :

$$\phi = \frac{\epsilon_c}{k D} = \frac{\epsilon_t}{(1 - k) D} \quad (5. 44)$$

Dari persamaan (5. 42) dan (5. 44) didapat :

$$1/2 E_c \epsilon_c k D B = 1/2 E_t \epsilon_t (1 - k) D B$$

$$E_c \epsilon_c k = E_t \epsilon_t (1 - k)$$

$$E_c \frac{\epsilon_t k}{(1 - k)} k = E_t \epsilon_t (1 - k)$$

$$E_c k^2 = E_t (1 - k)^2$$

$$\frac{E_c}{E_t} k^2 = (1 - k)^2$$

$$\sqrt{\frac{E_c}{E_t}} k = 1 - k$$

$$k + k \sqrt{\frac{E_c}{E_t}} = 1$$

$$k (1 + \sqrt{\frac{E_c}{E_t}}) = 1$$

$$k = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{E_c}{E_t}}} \quad (5. 45)$$

Dengan tulangan rangka (  $\epsilon_{st} \leq \epsilon_{sy}$  )

$$T_s = E_{st} \epsilon_{st} A_{st} \quad (5. 46)$$

dimana :  $T_s$  = gaya tarik pada tulangan rangka

$A_{st}$  = luas dari tulangan rangka

$E_{st}$  = modulus elastisitas tulangan rangka

$\epsilon_{st}$  = regangan tarik tulangan rangka

Terjadi kesetimbangan momen :

$$C = T + T_s \quad (5. 47)$$

$$M = 2/3 [T (1 - k) + C k] D + T_s (K - k) D \quad (5. 48)$$

dimana :  $K$  = faktor perbandingan dari letak titik berat tulangan rangka terhadap tinggi penampang

Posisi dari sumbu netral adalah :

$$k = \frac{-(E_{st} p' + E_t) \pm \sqrt{(E_{st} p')^2 + 2 E_{st} p' (E_t - E_t K + E_c K) + E_c E_t}}{(E_c - E_t)} \quad (5. 49)$$

$$\text{sedangkan : } p' = \frac{A_s}{B D}$$

#### 4. 2. Kasus 2 : Penampang bagian tarik dalam daerah retak dan bagian tekan dalam daerah elastis

Dengan distribusi jaring tulangan yang merata dan mengabaikan pengaruh tulangan rangka, para ahli yang mengadakan percobaan memperoleh perumusan empiris sebagai berikut [19] :

$$\sigma_{cr} = 1,96 p + 3,33 \text{ MPa} \quad (5. 50)$$

atau :

$$\sigma_{cr} = 280,2 S_L + f_m \text{ MPa} \quad (5. 51)$$

dimana :  $p$  = persentase dari penulangan

$s_L$  = spesifik surface penulangan dalam arah beban

$f_m$  = modulus retak dari mortar

Tanpa tulangan rangka

$$T_1 = 1/2 B D E_t \epsilon_{cr} \quad (5. 52)$$

$$T_2 = 1/2 B (1 - k - \xi) D E_t \epsilon_{cr} \quad (5. 53)$$

$$T_3 = 1/2 B (1 - k - \xi) D [E_t \epsilon_{cr} + E_{cr} (\epsilon_t - \epsilon_{cr})] \quad (5. 54)$$

terjadi kesetimbangan gaya dan momen :

$$C = T_1 + T_2 + T_3 \quad (5. 55)$$

$$M = 2/3 D (C k + T_1 \xi) + 1/3 (1 - k + 2 \xi) D T_2 + 1/3 (2 - 2 k + \xi) D T_3 \quad (5. 56)$$

Besarnya curvature :

$$\phi = \frac{\epsilon_{cr}}{\xi D} \quad (5. 57)$$

sedangkan :

$$\epsilon_{cr} = \frac{\sigma_{cr}}{E_t}$$

$$\xi = \frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_t} (1 - k) \quad (5. 58)$$

Sumbu netral diperoleh sebagai berikut :

$$k = \frac{-q \pm \sqrt{m_1 q}}{(m_1 - q)} \quad (5. 59)$$

sedangkan :

$$m_1 = \frac{E_c}{E_{cr}} \quad (5. 60)$$

$$q = m_2 \frac{\alpha}{\gamma} (2 - \frac{\alpha}{\gamma}) + (1 - \frac{\alpha}{\gamma})^2 \quad (5. 61)$$

$$m_2 = \frac{E_t}{E_{cr}} \quad (5.62)$$

$$\alpha = \frac{E_{cr}}{E_{ty}} \quad (5.63)$$

$$\gamma = \frac{E_t}{E_{ty}} \quad (5.64)$$

Dengan tulangan rangka (  $\epsilon_{st} \leq \epsilon_{sy}$  )

Terjadi kesetimbangan gaya dan momen :

$$C = T_1 + T_2 + T_3 + T_s \quad (5.65)$$

$$M = \frac{2}{3} D (C k + T_1 \xi) + \frac{1}{3} (1 - k + 2 \xi) D T_2 + \frac{1}{3} (2 - 2 k + \xi) D T_3 + (K - k) D T_s \quad (5.66)$$

Posisi sumbu netral :

$$k = \frac{-(m_s p' + q) \pm \sqrt{(m_s p')^2 + 2 m_s p' (q - K_q + m_1 K) + m_1 q}}{(m_1 - q)} \quad (5.67)$$

sedangkan :

$$m_s = \frac{E_{st}}{E_{cr}} \quad (5.68)$$

4. 3. Kasus 3a : Penampang bagian tarik dalam daerah retak dan bagian tekan dalam daerah plastis.

Tanpa tulangan rangka

$$C_1 = \frac{1}{3} \lambda D B E_c \epsilon_{cy} \quad (5.69)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} (k - \lambda) D B E_c \epsilon_{cy} \quad (5.70)$$

Terjadi kesetimbangan gaya dan momen :

$$C_1 + C_2 = T_1 + T_2 + T_3 \quad (5.71)$$

$$M = \frac{2}{3} \lambda D C_1 + \frac{1}{2} (k + \lambda) D C_2 + \frac{2}{3} \xi D T_1 + \frac{1}{3} (1 - k + 2 \xi) D T_2 + \frac{1}{3} (2 - 2 k + \xi) D T_3 \quad (5.72)$$

sedangkan :

$$\lambda = \frac{\epsilon_{cy}}{\epsilon_t} (1 - k) \quad (5.73)$$

Besarnya curvature sama dengan persamaan (5.57), yaitu:

$$\phi = \frac{\epsilon_{cr}}{\xi D}$$

Posisi sumbu netral :

$$k = \frac{m_1 \frac{\beta^2}{\gamma^2} + q}{m_1 \frac{\beta}{\gamma} (2 + \frac{\beta}{\gamma}) + q} \quad (5.74)$$

sedangkan :

$$\beta = \frac{\epsilon_{cy}}{\epsilon_{ty}} \quad (5.75)$$

Dengan tulangan rangka (  $\epsilon_{st} \leq \epsilon_{sy}$  )

Terjadi kesetimbangan gaya dan momen :

$$\begin{aligned} C_1 + C_2 &= T_1 + T_2 + T_3 + T_s \\ M &= \frac{2}{3} \lambda D C_1 + \frac{1}{2} (k + \lambda) D C_2 + \frac{2}{3} \xi D T_1 + \\ &\quad \frac{1}{3} (1 - k + 2 \xi) D T_2 + \frac{1}{3} (2 - 2k + \xi) D T_3 + \\ &\quad (K - k) D T_s \end{aligned} \quad (5.76)$$

Posisi sumbu netral :

$$k = \frac{(Q + m_s p') \pm \sqrt{m_1^2 \frac{\beta^2}{\gamma^2} + m_s p' [m_s p' - 2 m_1 \frac{\beta}{\gamma} K + 2 Q (1 - K)]}}{Q + m_1 \frac{\beta}{\gamma}} \quad (5.77)$$

sedangkan :

$$Q = m_1 \frac{\beta}{\gamma} + m_1 \frac{\beta^2}{\gamma^2} + q \quad (5.78)$$

4. 4. Kasus 3b : Penampang bagian tarik dalam daerah leleh dan bagian tekan dalam daerah elastis

Tanpa tulangan rangka

$$T_2 = 1/2 \lambda D B E_t \epsilon_{cr} \quad (5.79)$$

$$T_3 = 1/2 \lambda D B [E_t \epsilon_{cr} + E_{cr} (\epsilon_{ty} - \epsilon_{cr})] \quad (5.80)$$

$$T_4 = [1 - k - \xi - \psi] D B [E_t \epsilon_{cr} + E_{cr} (\epsilon_{ty} - \epsilon_{cr})] \quad (5.81)$$

Terjadi kesetimbangan gaya dan momen :

$$C = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad (5.82)$$

$$M = 2/3 k D C + 2/3 \xi D T_1 + (\xi + 1/3 \psi) D T_2 + (\xi + 2/3 \psi) D T_3 + 1/2 (1 - k + \xi + \psi) D T_4 \quad (5.83)$$

sedangkan :

$$\psi = \frac{1}{\gamma} (1 - \alpha) (1 - k) \quad (5.84)$$

Besarnya curvature sama dengan persamaan (5.57), yaitu:

$$\phi = \frac{\epsilon_{cr}}{\xi D}$$

Posisi sumbu netral :

$$k = \frac{t \pm \sqrt{-m_1 t}}{(m_1 + t)} \quad (5.85)$$

sedangkan :

$$t = m_2 \frac{\alpha}{\gamma^2} (\alpha - 2 \gamma) + \frac{1}{\gamma^2} (1 - \alpha) (1 + \alpha - 2 \gamma) \quad (5.86)$$

Dengan tulangan rangka ( $\epsilon_{st} \leq \epsilon_{sy}$ )

Terjadi kesetimbangan gaya dan momen :

$$C = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_s \quad (5.87)$$

$$M = \frac{2}{3} k D C + \frac{2}{3} \xi D T_1 + (\xi + \frac{1}{3} \psi) D T_2 + \\ (\xi + \frac{2}{3} \psi) D T_3 + \frac{1}{2} (1 - k + \xi + \psi) D T_4 + \\ (K - k) D T_s \quad (5.88)$$

Posisi sumbu netral :

$$k = \frac{t - m_s p' \pm \sqrt{m_s p' (m_s p' - 2t + 2m_1 K + 2K t) m_1 t}}{m_1 + t} \quad (5.89)$$

sedangkan :

$$m_s = \frac{E_{st}}{E_{cr}} \quad (5.90)$$

#### 4. 5. Kasus 4 : Penampang bagian tarik dan tekan berada dalam daerah leleh

Tanpa tulangan rangka

Terjadi kesetimbangan gaya dan momen :

$$C_1 + C_2 = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad (5.91)$$

$$M = \frac{2}{3} \lambda D C_1 + \frac{1}{2} (\lambda + k) D C_2 + \frac{2}{3} \xi D T_1 + \\ (\xi + \frac{1}{3} \psi) D T_2 + (\xi + \frac{2}{3} \psi) D T_3 + \\ \frac{1}{2} (1 - k + \xi + \psi) D T_4 \quad (5.92)$$

Besarnya curvature sama dengan persamaan (5. 57).

Posisi sumbu netral :

$$k = \frac{t - m_1 \frac{\alpha^2 \rho^2}{\gamma^2}}{t - 2 m_1 \frac{\alpha}{\gamma} - m_1 \frac{\alpha^2 \rho^2}{\gamma^2}} \quad (5.93)$$

sedangkan :

$$\rho = \frac{\epsilon_{cy}}{\epsilon_{cr}} \quad (5.94)$$

Dengan tulangan rangka

Terjadi kesetimbangan gaya dan momen :

$$C_1 + C_2 = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_s \quad (5.95)$$

$$M = \frac{2}{3} \lambda D C_1 + \frac{1}{2} (\lambda + k) D C_2 + \frac{2}{3} \xi D T_1 + (\xi + \frac{1}{3} \psi) D T_2 + (\xi + \frac{2}{3} \psi) D T_3 + \frac{1}{2} (1 - k + \xi + \psi) D T_4 + (K - k) D T_s \quad (5.96)$$

Posisi sumbu netral :

$$k = \frac{(G - m_s \rho') \pm \sqrt{m_s^2 \frac{\alpha^2}{r^2} - m_s \rho' [2 G (1 - K) - m_s \rho' + 2 m_1 K \frac{\alpha}{r}]}{G - m_1 \frac{\alpha}{r}} \quad (5.97)$$

sedangkan :

$$G = t - m_1 \frac{\alpha \rho}{\gamma} - m_1 \frac{\alpha^2 \rho^2}{\gamma^2} \quad (5.98)$$

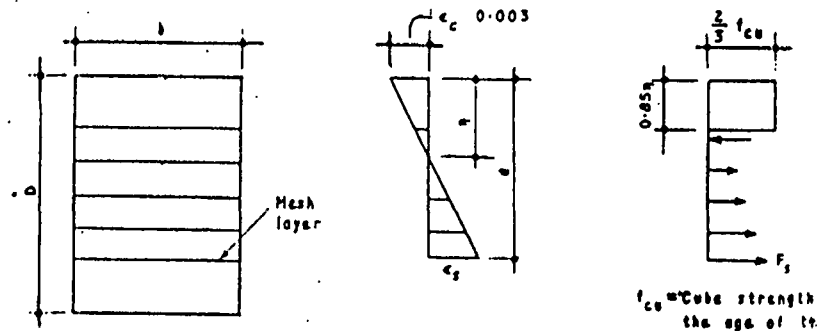
#### 4. 6. Kapasitas momen batas

Besarnya momen batas dapat dihitung dari persamaan (5.92) atau (5.96) bila memakai tulangan rangka, dengan memasukkan nilai  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$  atau  $\epsilon_t = \epsilon_{tu}$ . Regangan batas bagian tarik dipakai regangan batas dari jaring tulangan, sedangkan regangan batas bagian tekan diambil sebesar 0,006.

Metode lain yang menggunakan pendekatan teori beton bertulang dibuat oleh Surya Kumar dan P.C Sharma [27] dengan memakai anggapan-anggapan :

- Regangan tekan batas mortar = 0,003
- Diagram regangan berupa garis lurus

- Besarnya tegangan tekan batas mortar =  $2/3 f_c'$
- Kekuatan tarik mortar diabaikan
- Tinggi blok diagram tegangan tekan =  $0,85$  garis netral

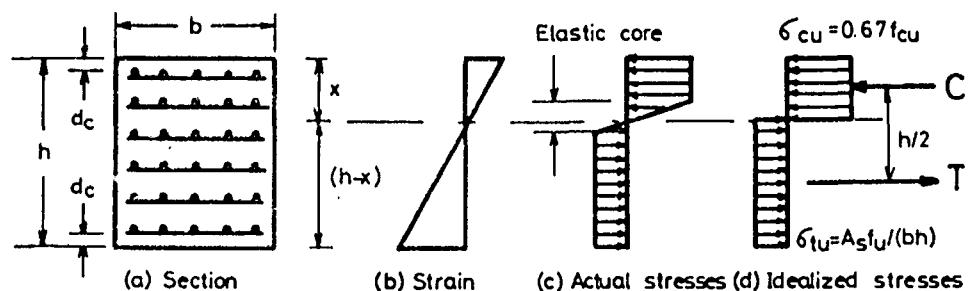


Gambar.14 Diagram tegangan pada keadaan batas

Untuk menentukan letak garis netral dan kapasitas momen batas dipakai cara coba mencoba. Kesulitan yang timbul adalah bila dipakai jumlah lapis jaring tulangan yang cukup banyak.

Untuk mengatasi kesulitan diatas, Mansur dan Paramasivam [18] melakukan penyederhanaan pada diagram tegangan hingga diperoleh rumus yang sederhana untuk kondisi jaring tulangan yang menyebar dan jaring tulangan pada daerah tarik saja.

a. Jaring tulangan menyebar pada seluruh penampang



Gambar.15 Diagram tegangan pada keadaan batas untuk jaring tulangan yang menyebar

$$C = \sigma_{cu} b x$$

$$T = \sigma_{tu} b (h - x)$$

Dengan kesetimbangan  $C = T$  diperoleh :

$$x = \frac{\sigma_{tu} h}{\sigma_{cu} + \sigma_{tu}}$$

Hingga kapasitas momen batas yang dihasilkan adalah :

$$M_u = \sigma_{tu} b (h - x) h/2 \quad (5.99)$$

Sedangkan :

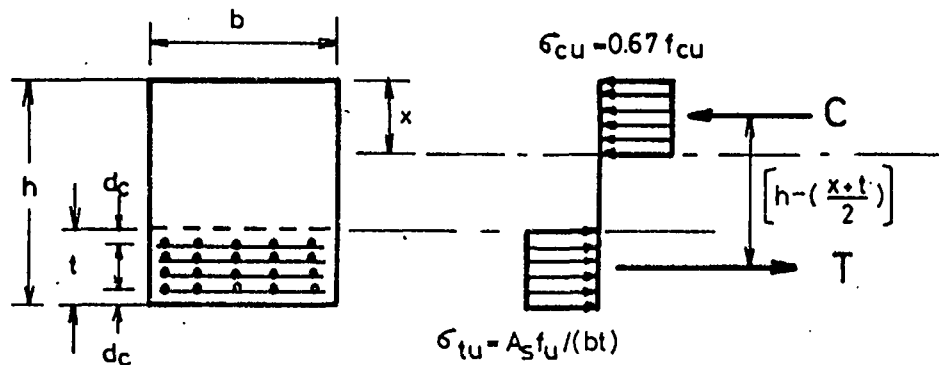
$$\sigma_{tu} = A_s f_u / b h$$

$$\sigma_{cu} = 0,67 f_c'$$

dimana :  $f_u$  = Tegangan batas jaring tulangan

$f_c'$  = Tegangan tekan batas mortar

**b. Jaring tulangan hanya pada daerah tarik**



Gambar.16 Diagram tegangan pada keadaan batas untuk jaring tulangan pada daerah tarik saja

$$C = \sigma_{cu} b x$$

$$T = \sigma_{tu} b t$$

Dengan kesetimbangan  $C = T$  diperoleh :

$$x = \sigma_{tu} t / \sigma_{cu}$$

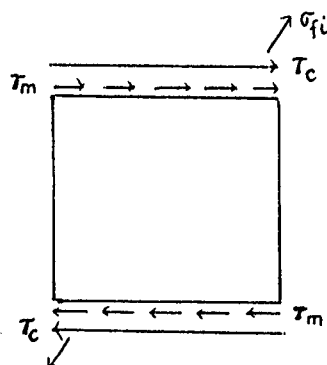
Hingga kapasitas momen batas yang diperoleh adalah :

$$M_u = \sigma_{tu} b + \left\{ h - t/2 \left( \frac{\sigma_{cu} + \sigma_{tu}}{\sigma_{cu}} \right) \right\} \quad (5.100)$$

## 5. KEKUATAN GESER DAN DEFORMASI GESER

Struktur ferrocement mempunyai perbandingan antara bentang dan tebal yang cukup besar, hingga kehancuran akibat geser biasanya didahului oleh kehancuran akibat tegangan-tegangan yang lain [24]. Oleh karena itu pembahasan mengenai kekuatan geser dan data-data hasil tes jarang dijumpai [7].

Secara teoritis, sama seperti penurunan rumus untuk tarik, gaya tahanan terhadap geser pada ferrocement diterima oleh mortar dan jaring tulangan secara bersama.



Gb. 17 : Pembagian gaya geser pada mortar dan tulangan

Sesuai dengan ketentuan didepan bahwa  $F_i = \cos \theta$ , maka untuk komponen horisontal dari  $\sigma_{fi}$  adalah  $\sigma_{fi} \sin \theta$ , sedangkan :

$$\begin{aligned} \sin \theta &= (1 - \cos^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \\ &= (1 - F_i^2)^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

$$\text{jadi : } \sigma_{fi} \sin \theta = \sigma_{fi} (1 - F_i^2)^{\frac{1}{2}}$$

didapat :

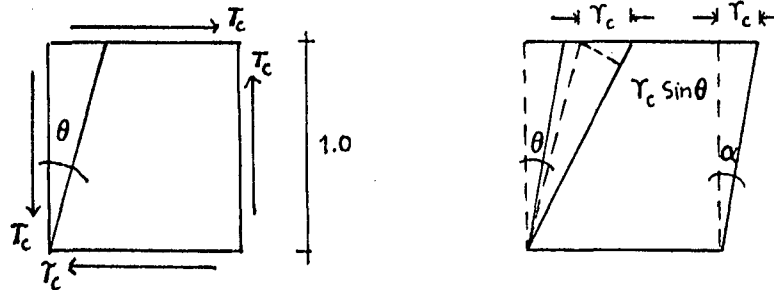
$$\tau_c = \tau_m A_m + \sum_{i=1}^N (1 - F_i^2)^{\frac{1}{2}} \sigma_{fi} A_{fi} \quad (5. 101)$$

$$\tau_c = \tau_m v_m + \sum_{i=1}^N F_i (1 - F_i^2)^{\frac{1}{2}} \sigma_{fi} v_{fi} \quad (5. 102)$$

dimana :  $\tau_c$  = Tegangan geser komposit

$\tau_m$  = Tegangan geser mortar

Dengan adanya gaya geser maka timbul perubahan bentuk, seperti halnya gaya aksial menimbulkan perpanjangan/perpendekan. Perbedaannya ialah pada deformasi geser suatu elemen tidak mengalami perubahan kearah panjangnya.



Gb. 18 Deformasi geser pada ferrocement dan tulangnya

Regangan pada tulangan i adalah :

$$\begin{aligned} \epsilon_i &= \frac{\Delta l}{l} = \frac{\gamma_c \sin \theta}{1/\cos \theta} \\ &= \gamma_c F_i (1 - F_i^2)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (5. 103)$$

Perubahan bentuk pada komposit menimbulkan perubahan sudut sebesar :

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\gamma_c}{1} = \gamma_c$$

Karena bahan mengikuti hukum Hooke, maka perubahan sudut sebanding dengan besarnya tegangan geser dan sifat bahan, yaitu :

$$\alpha = \frac{\tau}{G}$$

$$\gamma_c = \frac{\tau}{G} \quad (5. 104)$$

Perubahan sudut pada mortar ( $\gamma_m$ ) sama dengan perubahan sudut pada komposit karena tidak terjadi slip. Dari perumusan tegangan geser diatas didapatkan :

$$G_C \gamma_C = G_m \gamma_m v_m + \sum_{i=1}^N F_i (1 - F_i^2)^{\frac{1}{2}} E_{fi} \epsilon_{fi} v_{fi}$$

$$G_C = G_m v_m + \sum_{i=1}^N F_i (1 - F_i^2)^{\frac{1}{2}} E_{fi} v_{fi} \frac{\epsilon_{fi}}{\gamma_C}$$

$$G_C = G_m v_m + \sum_{i=1}^N F_i (1 - F_i^2)^{\frac{1}{2}} E_{fi} v_{fi} F_i (1 - F_i^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$G_C = G_m v_m + \sum_{i=1}^N F_i^2 (1 - F_i^2) E_{fi} v_{fi} \quad (5. 105)$$

dimana :  $G_C$  = modulus geser komposit

$G_m$  = modulus geser mortar

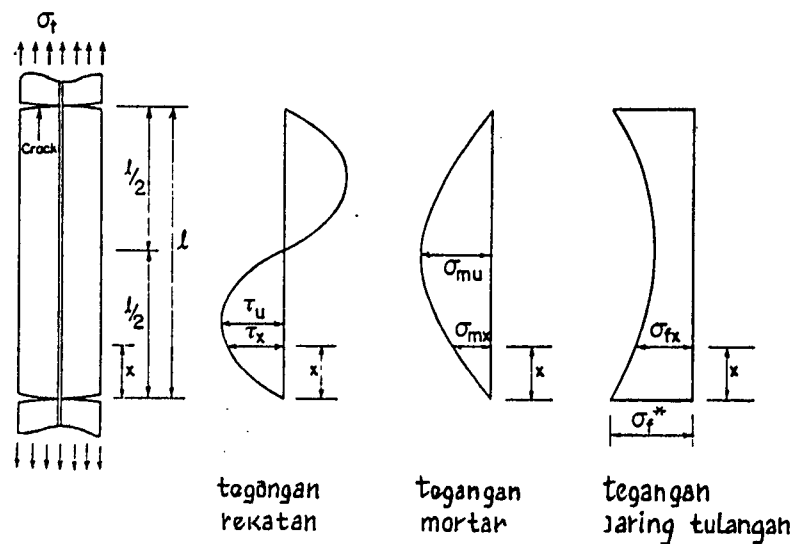
## 6. SPASI RETAK DAN LEBAR RETAK.

Serviceability sangat tergantung pada keretakan dan lebar retak, oleh karena itu prediksi tentang spasi retak dan lebar retak sangat penting dalam perencanaan. Kelakuan retak pada ferrocement berbeda dengan beton bertulang, hal ini disebabkan oleh :

1. Ferrocement penampangnya tipis dan jaring tulangnya tersebar merata keseluruh penampang.
2. Ferrocement memiliki spesifik surface tulangan yang lebih besar untuk jumlah tulangan yang sama.
3. Ferrocement memakai jaring tulangan sehingga memper-tinggi luas permukaan rekatannya.

Mekanisme terjadinya retak.

Mekanisme terjadinya retak dipelajari secara teoritis oleh Hug dan Pama [8], dimana besarnya tegangan pada mortar dan tulangan ditentukan oleh distribusi serta besar tegangan rekatan antara mortar dan tulangan. Retak akan terjadi bila beban luar bertambah dan tegangan mortar melampaui tegangan tarik ijinnya. Retak akan terus muncul hingga terjadi slip yang besar dan spasi retaknya menjadi pendek-pendek. Bila keadaan ini telah tercapai maka spasi retak akan tetap sedangkan lebar retak akan bertambah besar sebanding dengan pertambahan tegangan tarik pada tulangan.



Gb. 19 Pembagian tegangan pada mekanisme retak

Besarnya distribusi tegangan rekatan merupakan fungsi sinus, adalah sebagai berikut :

$$\tau_x = \tau_u \sin \left( \frac{2\pi x}{l} \right) \quad (5. 106)$$

Tegangan tarik pada mortar merupakan fungsi dari tegangan

rekatan, yaitu :

$$\sigma_{mx} = \frac{1}{A_{mm}} \int_0^x \tau_x \pi d \, dx \quad (5. 107)$$

dimana :  $A_{mm}$  = luas penampang mortar untuk 1 tulangan

$$= \frac{D S_f}{n} - \frac{\pi d^2}{4}$$

$\pi d$  = keliling tulangan

Tegangan maksimum bila  $x = 1/2 \, l$

$$\begin{aligned} \sigma_{mu} &= \frac{\pi d}{A_{mm}} \int_0^{1/2 l} \tau_u \sin \frac{2\pi x}{l} \, dx \\ \sigma_{mu} &= \frac{\pi d}{A_{mm}} \tau_u \frac{1}{2\pi} \int_0^{1/2 l} \sin \frac{2\pi x}{l} \, d \frac{2\pi}{l} x \\ \sigma_{mu} &= \frac{\pi d}{A_{mm}} \tau_u \frac{1}{2\pi} \left[ -\cos \frac{2\pi x}{l} \right]_0^{1/2 l} \\ \sigma_{mu} &= \frac{\pi d}{A_{mm}} \tau_u \frac{1}{2\pi} (1 + 1) \\ \sigma_{mu} &= \frac{\tau_u d l}{A_{mm}} \quad (5. 108) \end{aligned}$$

Tegangan tarik pada penulangan, adalah :

$$\sigma_{fx} = \sigma_f^* - \sigma_{mx} \frac{A_{mm}}{A_f} \quad (5. 109)$$

dimana :  $\sigma_f^*$  = tegangan tulangan pada saat retak

$$\begin{aligned} A_f' &= \text{luas penampang satu tulangan} \\ &= \pi d^2 / 4 \end{aligned}$$

## 6. 1. Spasi retak

Besarnya spasi retak dapat diperoleh dari persamaan

(5. 108), yaitu .:

$$\sigma_{mu} = \frac{\tau_u d l}{A_{mnn}}$$

$$l = \frac{\sigma_{mu} A_{mm}}{\tau_u d} \quad (5. 110)$$

Besarnya spasi retak juga dapat diperoleh dari persamaan sebagai berikut :

$$l = \frac{\theta}{\eta'} \frac{1}{S_L} \quad (5. 111)$$

dimana :  $\theta$  = perbandingan antara spasi retak rata-rata dengan spasi retak minimum.

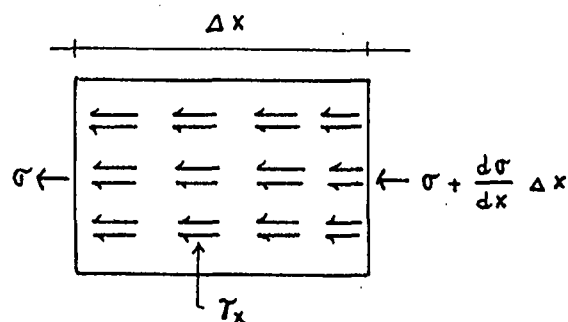
$$\approx 1,5$$

$\eta'$  = perbandingan antara tegangan rekatan dengan tegangan tarik mortar

$$\approx 1,5 - 2 , \text{ biasanya diambil } 1,6$$

$S_L$  = spesific surface tulangan

Pada persamaan (5. 110) spasi retak yang diperoleh adalah maksimum karena komponen-komponennya merupakan tegangan yang maksimum pula. Sedangkan persamaan (5. 111) merupakan spasi retak rata-rata yang diperoleh dari kesetimbangan antara tegangan rekatan dengan selisih tegangan yang bekerja pada 1 unit luasan ferrocement seperti yang terlihat pada gambar 20.



Gambar 20. Kesetimbangan tegangan rekatan ferrocement

## 6. 2. Lebar retak

Lebar retak diperoleh dari selisih antara pertambahan panjang tulangan dengan pertambahan panjang mortar

$$w = \Delta l - \Delta l_m$$

$$\begin{aligned} l &= 2 \int_0^{1/2 L} \frac{\sigma_f x}{E_f} dx \\ &= \frac{2}{E_f} \int_0^{1/2 L} \left( \sigma_f^* - \sigma_{mx} \frac{A_{mm}}{A_f} \right) dx \\ &= \frac{2}{E_f} \left\{ \left[ \sigma_f^* x \right]_0^{1/2 L} - \int_0^{1/2 L} \frac{A_{mm}}{A_f} \left( \frac{\pi d}{A_{mm}} \int_0^x \tau_u \sin \frac{2\pi x}{l} dx \right) dx \right\} \\ &= \frac{2}{E_f} \left\{ \sigma_f^* \frac{l}{2} - \int_0^{1/2 L} \left[ \frac{\pi d}{A_f} \int_0^x \tau_u \sin \frac{2\pi x}{l} dx \right] dx \right\} \\ &= \frac{2}{E_f} \left\{ \sigma_f^* \frac{l}{2} - \int_0^{1/2 L} \frac{\pi d}{A_f} \tau_u \frac{1}{2\pi} \left[ -\cos \frac{2\pi x}{l} \right]_0^x dx \right\} \\ &= \frac{2}{E_f} \left\{ \sigma_f^* \frac{l}{2} - \int_0^{1/2 L} \frac{\pi d}{A_f} \tau_u \frac{1}{2\pi} \left( -\cos \frac{2\pi x}{l} + 1 \right) dx \right\} \\ &= \frac{2}{E_f} \left\{ \sigma_f^* \frac{l}{2} - \frac{\tau_u d l}{2 A_f} \left[ -\frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi x}{l} + x \right]_0^{1/2 L} \right\} \\ &= \frac{1}{E_f} \left\{ \sigma_f^* l - \frac{\tau_u d l^2}{2 A_f} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_m &= 2 \int_0^{1/2 L} \frac{\sigma_{mx}}{E_m} dx \\ &= \frac{2}{E_m} \int_0^{1/2 L} \left( \frac{\pi d}{A_{mm}} \tau_u \sin \frac{2\pi x}{l} \right) dx \\ &= \frac{2}{E_m} \int_0^{1/2 L} \frac{\pi d}{A_{mm}} \tau_u \frac{1}{2\pi} \left( -\cos \frac{2\pi x}{l} + 1 \right) dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{2}{E_m} \frac{\pi d}{A_{mm}} \tau_u \frac{1}{2\pi} \left[ -\frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi x}{l} + x \right]^{1/2l} \\
&= \frac{\tau_u d l^2}{E_m 2 A_{mm}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
w &= \Delta l - \Delta l_m \\
&= \frac{1}{E_f} \left[ \sigma_f^* l - \frac{\tau_u d l^2}{2 A_f} \right] - \frac{\tau_u d l^2}{E_m 2 A_{mm}} \\
&= \frac{1}{E_f} \left[ \sigma_f^* l - \frac{\tau_u d l^2}{2 A_f} - \frac{\tau_u d l^2 E_f}{2 A_{mm} E_m} \right] \\
&= \frac{1}{E_f} \left[ \sigma_f^* l - \frac{\tau_u d l^2}{2 A_{mm}} \left( \frac{A_{mm}}{A_f} + \frac{E_f}{E_m} \right) \right] \quad (5. 112)
\end{aligned}$$

Perumusan lebar retak yang lebih sederhana diturunkan oleh Perumalsamy N. Balaguru [3] dengan memperhatikan regangan tarik tulangan yang terbesar serta spasi jaring tulangan dalam arah tranversal, diperoleh :

$$w = \epsilon_s S R \quad (5. 113)$$

dimana:  $\epsilon_s$  = regangan tarik tulangan yang terbesar

$S$  = spasi tulangan dalam arah tranversal

$R$  = perbandingan jarak garis netral ke bagian tarik terluar dengan ke titik berat tulangan

Dari hasil percobaan diperoleh rumus empiris sebagai berikut [24] :

Beban tarik :

Untuk :  $f_s \leq 345 S_{RL}$

$$w_{max} = \frac{35.000}{E_R}$$

$$f_s > 345 S_{RL}$$

$$w_{\max} = \frac{20}{E_R} [175 + 3,69 (f_s - 345 S_{RL})]$$

Beban lentur :

$$w_{\max} = (1,194 f_s - 111) \frac{15,85}{E_R}$$

dimana :  $f_s$  = tegangan pada jaring tulangan yang terluar  
( $N/mm^2$ )

$S_{RL}$  = spesifik surface jaring tulangan dalam arah  
beban (1/cm)

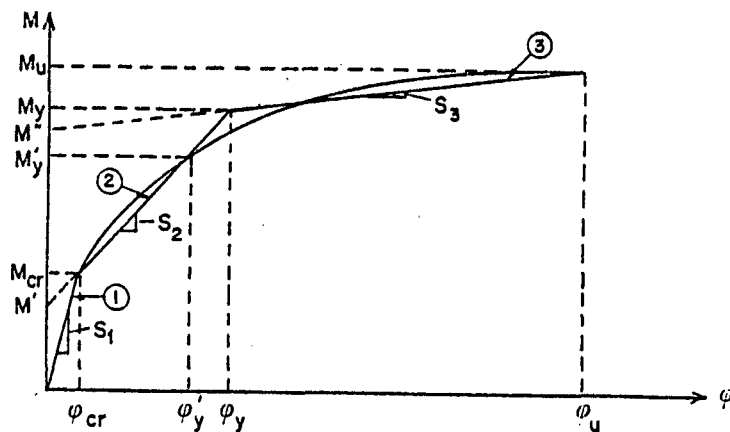
$E_R$  = modulus efektif jaring tulangan (N/mm)

$w_{\max}$  = lebar retak maksimum (mm)

## 7. DIAGRAM M - $\phi$ DAN DEFLEKSI

### 7. 1. Diagram M - $\phi$

Telah diketahui momen - curvature sebelum retak berupa garis lurus. Dalam daerah retak kurva M -  $\phi$  tidak lagi berupa garis lurus tetapi biasanya diidealisasikan sebagai garis lurus seperti terlihat pada gambar 21.



Gb. 21 Idealisasi diagram M -  $\phi$

Besarnya momen retak dapat diperoleh dari persamaan (5. 43) yang telah disederhanakan dengan memasukkan nilai  $C$ ,  $T$  dan hubungan antara  $\epsilon_c$  dan  $\epsilon_t$  pada persamaan (5. 44) serta hubungan  $E_c$  dan  $E_t$  pada persamaan (5. 45) adalah sebagai berikut :

$$M = 2/3 \left[ 1/2 E_t \epsilon_t (1 - k) b D (1 - k) + 1/2 E_c \epsilon_c k b D k \right] D$$

$$M = 2/3 \left[ 1/2 E_t \epsilon_t (1 - k)^2 b D + 1/2 \frac{E_t (1 - k)^2}{k^2} \frac{\epsilon_t k}{(1 - k)} k^2 b D \right] D$$

$$M = 1/3 E_t \epsilon_t (1 - k) b D^2$$

$$M = 1/3 \sigma_t (1 - k) b D^2$$

Jadi momen dari penampang tarik yang mengalami retak :

$$M_{Cr} = 1/3 \sigma_{Cr} (1 - k) b D^2 \quad (5. 114)$$

dimana :  $\sigma_{Cr}$  = tegangan pada penampang tarik yang retak

Besarnya momen leleh diperoleh dari perumusan empiris sebagai berikut [19] :

$$M_y = M_y' + 0,7 (M_u - M_y') \quad (5. 115)$$

sedangkan :

$$M_y' = M_{ty} , \quad \text{bila } M_{ty} < M_{cy}$$

$$M_y' = M_{cy} , \quad \text{bila } M_{cy} < M_{ty}$$

dimana:  $M_{ty}$  = momen dimana penampang tarik mencapai leleh

$M_{cy}$  = momen dimana penampang tekan mencapai leleh

Dari gambar 21. diperoleh besarnya  $\phi_y$  adalah :

$$\phi_y = \frac{(M_y - M')}{S_2} \quad (5. 116)$$

sedangkan :

$$M' = M_{Cr} - \phi_{Cr} S_2 \quad (5. 117)$$

dimana :  $S_2$  = slope daerah retak, pada gambar 21.

## 7. 2. Defleksi

Berdasarkan diagram  $M - \phi$ , defleksi dihitung untuk daerah elastis, daerah retak dan daerah leleh. Perhitungan memakai metode momen area sebagai berikut:

$$\Delta = \frac{M \times dx}{EI} \quad (5. 118)$$

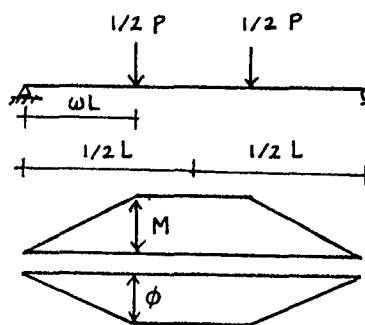
$$\phi = \frac{M \, dx}{EI} \quad (5. 119)$$

Defleksi ditengah bentang adalah defleksi maksimum, dapat dihitung sebagai momen statis dari setengah bagian  $\phi$  diagram terhadap perletakan. Beban-beban yang akan dibahas adalah beban terpusat dan beban merata diatas dua perletakan.

### 1. Beban terpusat.

Daerah elastis ( $0 \leq M \leq M_{Cr}$  ,  $0 \leq \phi \leq \phi_{Cr}$ )

#### a. Dua beban terpusat



Gb. 22 Distribusi momen dan curvature

$$\begin{aligned}
 \Delta &= 1/2 \phi wL \cdot 2/3 wL + \phi (1/2 L - wL) [wL + \\
 &\quad 1/2 (1/2 L - wL)] \\
 &= 1/3 \phi w^2 L^2 + 1/8 \phi L^2 - 1/2 \phi w^2 L^2 \\
 &= 1/24 \phi (3 - 4 w^2) L^2 \quad (5. 120)
 \end{aligned}$$

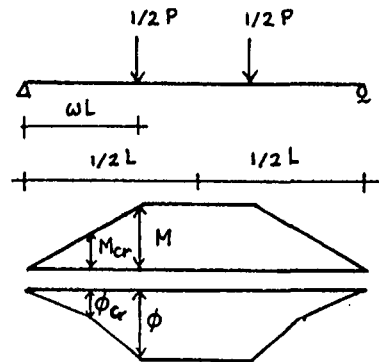
b. Beban terpusat ditengah bentang

Substitusi nilai  $w = 1/2$  pada persamaan (5. 120) diatas diperoleh :

$$\Delta = 1/12 \phi L^2 \quad (5. 121)$$

Daerah retak (  $M_{cr} \leq M \leq M_y$  ,  $\phi_{cr} \leq \phi \leq \phi_y$  )

a. Dua beban terpusat



Gb. 23 Distribusi momen dan curvature

$$\begin{aligned}
 \Delta &= \phi (1/2 L - wL) [wL + 1/2 (1/2 L - wL)] + \\
 &\quad 1/2 (\phi - \phi_{cr}) (wL - \frac{M_{cr}}{M} wL) [\frac{M_{cr}}{M} wL + 2/3 (wL - \\
 &\quad \frac{M_{cr}}{M} wL)] + \phi_{cr} (wL - \frac{M_{cr}}{M} wL) [\frac{M_{cr}}{M} wL + 1/2 (wL -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{M_{Cr}}{M} wL) + 1/2 \phi_{Cr} \frac{M_{Cr}}{M} wL - 2/3 \frac{M_{Cr}}{M} wL \\
& = \phi \left[ 1/8 L^2 - w^2 L^2 \left( 1/2 - 1/3 + 1/6 \frac{M_{Cr}}{M} + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. 1/6 \frac{M_{Cr}^2}{M^2} \right) + \phi_{Cr} w^2 L^2 \left( 1/2 - 1/2 \frac{M_{Cr}^2}{M^2} + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. 1/3 \frac{M_{Cr}^2}{M^2} - 1/3 + 1/6 \frac{M_{Cr}}{M} + 1/6 \frac{M_{Cr}^2}{M^2} \right) \right] \\
& = 1/24 \phi L^2 [3 - 4 w^2 (1 + r + r^2)] + 1/6 \phi_{Cr} \\
& \quad (wL)^2 (1 + r) \quad (5. 122)
\end{aligned}$$

dimana :  $r = \frac{M_{Cr}}{M}$

b. Beban terpusat ditengah bentang

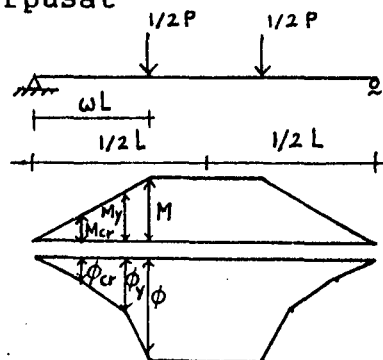
Substitusi nilai  $w = 1/2$  pada persamaan (5. 122)

diatas, diperoleh :

$$\begin{aligned}
\Delta &= 1/24 \phi L^2 [3 - 1 (1 + r + r^2)] + \\
& \quad 1/6 \phi_{Cr} 1/4 L^2 (1 + r) \\
&= 1/24 [\phi (2 - r - r^2) + \phi_{Cr} (1 + r)] L^2 \quad (5. 123)
\end{aligned}$$

Daerah leleh ( $M_y \leq M \leq M_u$  ,  $\phi_y \leq \phi \leq \phi_u$ )

a. Dua beban terpusat



Gb. 24 Distribusi momen dan curvature

Dengan metode diatas diperoleh :

$$\Delta = 1/24 \{ \phi \{ 3 - 4 w^2 (1 + r_1 + r_1^2) \} + 4 w^2 \{ \phi_{cr} (r_1 + r r_1) + 4 \phi_y (1 + r_1 - r_1 r - r^2) \} \} L^2 \quad (5. 124)$$

dimana :  $r_1 = \frac{M_y}{M}$

b. Beban terpusat ditengah bentang

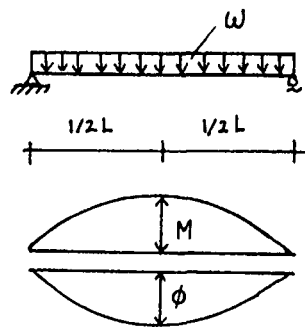
Substitusi nilai  $w = 1/2$  pada persamaan (5. 124)

didas, diperoleh :

$$\Delta = 1/24 \{ \phi (2 - r_1 - r_1^2) + 4 \phi_y (1 + r_1 - r_1 r - r^2) + \phi_{cr} (r_1 + r r_1) \} L^2 \quad (5. 125)$$

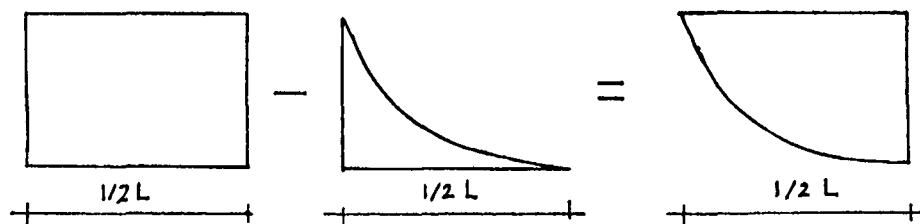
## 2. Beban merata

Daerah elastis ( $0 \leq M \leq M_{cr}$  ,  $0 \leq \phi \leq \phi_{cr}$ )

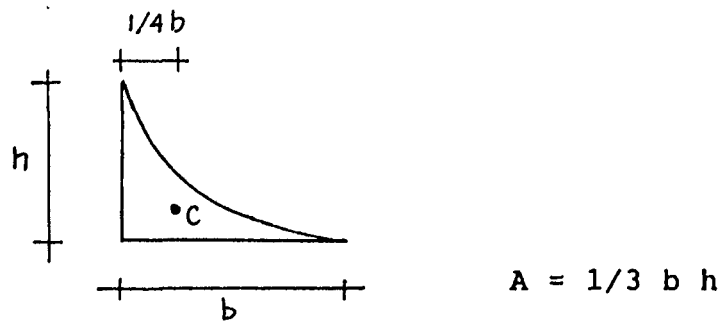


Gb. 25 Distribusi momen dan curvature

Untuk menghitungnya diagram bidang  $\phi$  dianggap :



dim ana :

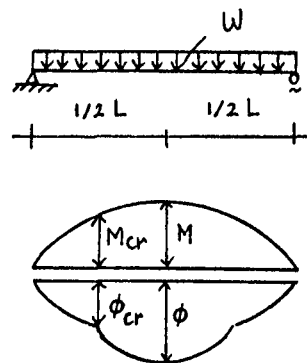


Gb. 26 Idealisasi diagram  $\phi$  dalam perhitungan momen

maka :

$$\begin{aligned}\Delta &= \phi \frac{1}{2} L \frac{1}{2} \frac{1}{2} L - \phi \frac{1}{2} L \frac{1}{3} \frac{1}{4} \frac{1}{2} L \\ &= \frac{1}{8} \phi L^2 - \frac{1}{48} \phi L^2 \\ &= \frac{5}{48} \phi L^2\end{aligned}\quad (5.126)$$

Daerah retak ( $M_{cr} \leq M \leq M_y$  ,  $\phi_{cr} \leq \phi \leq \phi_y$ )



Gb. 27 Distribusi momen dan curvature

$$M_{cr} = \frac{1}{2} w L X - \frac{1}{2} w X^2$$

$$M_{cr} = \frac{4 M}{L} X - \frac{4 M}{L^2} X^2$$

$$X^2 - L X + \frac{M_{cr}}{M} \frac{L^2}{4} = 0$$

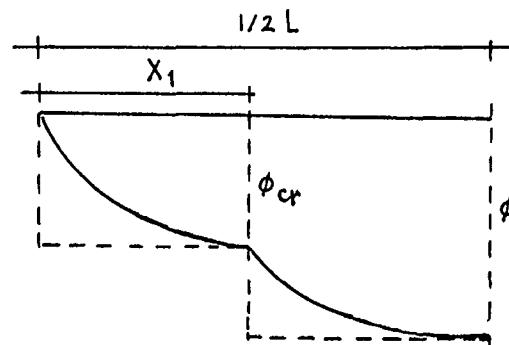
$$M = \frac{1}{2} w L \frac{1}{2} L - \frac{1}{2} w \left(\frac{1}{2} L\right)^2$$

$$M = \frac{1}{8} w L^2$$

$$w = \frac{8 M}{L^2}$$

dengan persamaan kwadrat diperoleh :

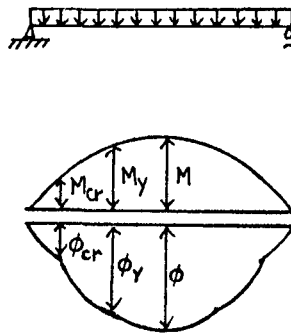
$$X_1 = \frac{1}{2} L - \frac{1}{2} L \sqrt{1 - M_{Cr}/M} = \frac{1}{2} L (1 - \sqrt{1 - M_{Cr}/M})$$



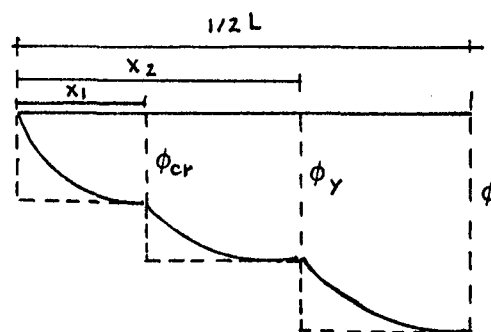
$$\begin{aligned}
 &= \phi \left[ \frac{1}{2} L - \frac{1}{2} L (1 - \sqrt{1 - M_{Cr}/M}) \right] \left\{ \frac{1}{2} L - \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} L - \right. \right. \\
 &\quad \left. \frac{1}{2} L (1 - \sqrt{1 - M_{Cr}/M}) \right] \} - \phi - \phi_{Cr} \left[ \frac{1}{2} L - \frac{1}{2} L (1 - \right. \\
 &\quad \left. \sqrt{1 - M_{Cr}/M}) \right] \frac{1}{3} \left\{ \frac{1}{2} L (1 - \sqrt{1 - M_{Cr}/M}) + \frac{1}{4} \right. \\
 &\quad \left. \left[ \frac{1}{2} L - \frac{1}{2} L (1 - \sqrt{1 - M_{Cr}/M}) \right] \right\} + \phi_{Cr} \frac{1}{2} L (1 - \\
 &\quad \sqrt{1 - M_{Cr}/M}) \frac{1}{2} \frac{1}{2} L (1 - \sqrt{1 - M_{Cr}/M}) - \phi_{Cr} \frac{1}{2} L \cdot \\
 &\quad (1 - \sqrt{1 - M_{Cr}/M}) \frac{1}{3} \frac{1}{2} \frac{1}{2} L (1 - \sqrt{1 - M_{Cr}/M}) \\
 &= \frac{1}{48} L^2 \left[ \phi (5 - 2r_2 - 3r_2) + \phi_{Cr} (1 + 2r_2 + 2r_2^2) \right] \\
 &\quad (5.127)
 \end{aligned}$$

$$\text{dimana : } r_2 = 1 - \sqrt{1 - \frac{M_{Cr}}{M}}$$

Daerah leleh ( $M_y \leq M \leq M_u$  ,  $\phi_y \leq \phi \leq \phi_u$ )



Gb. 28 Distribusi momen dan curvature



$$x_2 = \frac{1}{2} L (1 - \sqrt{1 - M_y/M})$$

Dengan pembagian diagram  $\phi$  seperti diatas tadi dan menjumlahkan momen statis tiap segmennya, didapat :

$$= \frac{1}{48} L^2 [\phi (5 - 2r_2 - 3r_2^2) + \phi_{cr} (2r_2^2 + 2r_2r_3 + r_3^2) + \phi_y (1 - 2r_2r_3 + 2r_3 - r_3^2)] \quad (5. 128)$$

sedangkan :

$$r_3 = 1 - \sqrt{1 - \frac{M_y}{M}}$$

Untuk perencanaan awal besarnya defleksi dapat dihitung memakai persamaan yang diusulkan oleh A.C.I

dan C.E.B [25] tanpa perhitungan yang terlalu rumit.

\* Perumusan A.C.I

$$\Delta = \frac{\beta L^2 M}{(EI)_{eff}} \quad (5. 129)$$

\* Perumusan C.E.B

$$\Delta = \frac{\beta L^2 M_{Cr}}{(EI)_{uncracked}} + \frac{\beta L^2 (M - M_{Cr})}{0,85 (EI)_{cracked}} \quad (5. 130)$$

sedangkan :

$$EI_{eff} = \left(\frac{M_{Cr}}{M}\right)^3 (EI)_{uncracked} + \left[1 - \left(\frac{M_{Cr}}{M}\right)^3\right] (EI)_{cr}$$

$$EI_{komposit} = EI_{mortar} + EI_{jaring tulangan}$$

$$EI_{mortar} = E_C (1/12 b d^3 + b d n_1^2)$$

$$EI_{jaring tulangan} = (E_s - E_C) \sum_{i=1}^{N_c} A_s d_s^2 + E_s \sum_{i=1}^{N_t} A_s d_s^2$$

dimana:  $\beta$  = konstanta jenis pembebanan

$L$  = panjang bentang

$b$  = lebar penampang

$n_1$  = jarak titik berat mortar yang tidak retak ke garis netral

$n_c$  = jumlah jaring tulangan di daerah tak retak

$n_t$  = jumlah jaring tulangan di daerah retak

$d_s$  = jarak tiap tulangan ke sumbu netral

$A_s$  = luas tiap tulangan

## 8. SHRINKAGE DAN CREEP

Shrinkage adalah perubahan volume yang terjadi karena perubahan kadar air baik pada waktu sebelum dan sesudah mortar mengeras. Sedangkan creep adalah

perubahan bentuk akibat adanya pembebanan. Regangan akibat shrinkage dan creep menimbulkan deformasi yang permanen dan retak.

Dengan penampang yang sangat tipis dan penyebaran jaring tulangan yang merata menyebabkan shrinkage dan creep ferrocement berbeda dengan beton bertulang biasa. Faktor-faktor yang mempengaruhi shrinkage dan creep adalah :

- \* Mortar : - gradasi pasir
  - water content
  - pemadatan
  - pemeliharaan
  - penutup permukaan
- \* Jaring tulangan : - spasi
  - jenis
  - specific surface dan volume fraction

## 9. KETAHANAN ( DURABILITY )

Tiga hal utama yang membedakan ketahanan ferrocement dari beton bertulang adalah :

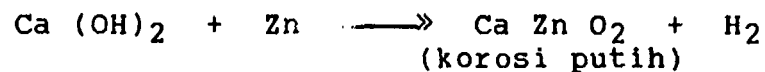
1. Penutup mortar yang relatif tipis memudahkan masuknya pengaruh lingkungan luar, misalnya : adanya cairan yang korosif.
2. Specific surface dari jaring tulangan yang besar mengakibatkan bila terjadi reaksi korosi akan cepat menyebar.
3. Jaring tulangan yang digunakan biasanya digalvanis

untuk mencegah korosi. Tetapi lapisan pelindung dari seng tersebut dapat mengalami korosi karena timbulnya gelembung-gelembung gas hidrogen ketika mortar masih belum mengeras.

### 9. 1. Korosi

Korosi dapat terjadi dalam keadaan mortar retak maupun tidak. Ketika mortar tidak retak, korosi dapat terjadi karena :

1. Lapisan seng bereaksi dengan kalsium hidroksida dalam pasta semen, membentuk kalsium zincate dan hidrogen [29].

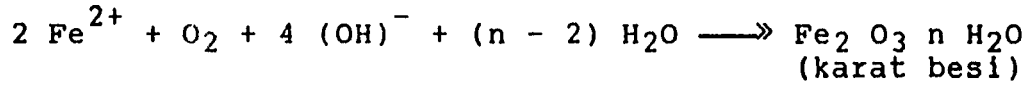


2. Pembentukan gas hidrogen pada saat mortar masih basah menyebabkan lapisan seng yang bertindak sebagai anode dan terjadi aliran elektron ke jaring tulangan yang bertindak sebagai katode, dimana hidrogen tersebut menyebabkan tekanan yang besar ke mortar disekitarnya sehingga mengurangi daya rekat antara mortar dan jaring tulangan [4].
3. Jaring tulangan yang digalvanis bila dipakai bersama tulangan rangka dari baja biasa, menyebabkan lapisan seng pada jaring tulangan galvanis bertindak sebagai anoda terhadap tulangan rangka baja, sehingga terbentuk zincate yang padat dan melapisi permukaan tulangan. Lapisan tersebut mengurangi daya rekatan antara mortar dan jaring tulangan [4].

Jika retak, reaksi yang terjadi adalah :



Maka reaksi pembentukan karat :



Satuan ukuran untuk korosi :

1. cpy = cm of penetration per year

$$\text{cpy} = \frac{d - d_f}{2} \frac{365}{t}$$

a. material yang baik :  $\text{cpy} \leq 0,013$

b. material yang dapat diterima :  $0,013 \leq \text{cpy} \leq 0,13$

c. material yang buruk :  $\text{cpy} > 0,13$

2. mdd = kehilangan berat dari logam dalam miligram per desimeter persegi luas permukaan dalam sehari

$$\text{mdd} = \frac{(K_o - K_f) \cdot 10}{\pi d l t}$$

3. plspy = persen kehilangan kekuatan dalam setahun.

$$\text{plspy} = \left( \frac{K_o - K_f}{K_o} \right) \frac{100 \times 365}{t}$$

dimana :  $K_o$  = berat mula-mula contoh (gram)

$K_f$  = berat akhir sesudah korosi (gram)

$d$  = diameter (cm)

$d_f$  = diameter akhir sesudah korosi (cm)

$l$  = panjang (cm)

$t$  = umur struktur (hari)

Besarnya kehilangan berat dan persen kehilangan kekuatan secara bersama-sama dapat memberikan gambaran apakah struktur masih mampu menahan beban yang ada

Pencegahan :

- a. Penutup spesi harus cukup tebal yaitu antara 1,5 mm - 3 mm. Untuk konstruksi kapal dianjurkan antara 3 mm - 4 mm.
- b. Menambahkan chromium trioxide sebanyak  $\pm$  200 ppm dalam air untuk mencegah pembentukan hidrogen.
- c. Membuat mutu mortar yang lebih baik dan impermeable.

# 10. KESIMPULAN

1. Jaringan tulangan pada Ferrocement dapat menerima beban dari segala arah, kemampuannya dinyatakan dengan faktor efektifitas jaring tulangan ( $\eta$ ).
2. Didalam merencanakan besarnya volume fraction jaring tulangan ( $v_f$ ) sebaiknya diambil antara 1% - 2.5 % serta memenuhi syarat  $V_1$  minimum.
3. Modulus Elastisitas Ferrocement tergantung pada besarnya % jaring tulangannya.
4. Perbandingan antara tebal penampang dan bentang yang relatif besar sehingga kehancuran akibat geser pada Ferrocement tidak dominan.