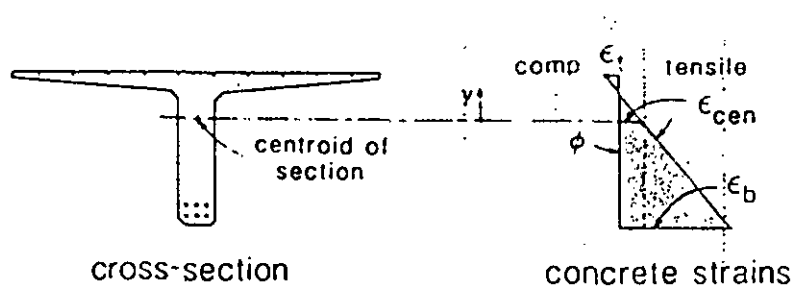


III. RESPON DARI PENAMPANG YANG DIBEKANI LENTUR

Respon dari penampang yang dibebani lentur dapat diperkirakan dengan menggunakan hubungan tegangan-regangan dari beton dan baja serta syarat-syarat kompatibilitas dan kesetimbangan dari penampang balok. Hubungan tegangan-regangan beton serta baja telah dijelaskan pada bab 2. Dalam menganalisa respon dari penampang yang dibebani lentur ini, adalah perlu untuk mengembangkan prosedur perhitungan yang lebih umum dari kombinasi lentur dan aksial, dimana untuk balok yang mengalami lentur murni, memiliki beban aksial sama dengan nol.

1. SYARAT-SYARAT KOMPATIBILITAS

Distribusi regangan beton dapat didefinisikan dengan hanya dua variabel (regangan pada permukaan atas dan regangan pada permukaan bawah dari penampang). Dua variabel yang kita pilih untuk mencari distribusi regangan linier adalah regangan pada garis netral penampang, ϵ_{cen} , dan kurvatur, ϕ . Lihat gambar 3.1. Kurvatur adalah sama dengan perubahan kemiringan per satuan panjang sepanjang penampang dan juga sama dengan gradien regangan sepanjang ketinggian penampang.



Gambar 3.1. Distribusi Regangan Beton^[6]

Jadi regangan beton pada tiap ketinggian y yang tertentu, adalah :

$$\epsilon_c = \epsilon_{cen} - \phi y \quad (3.1)$$

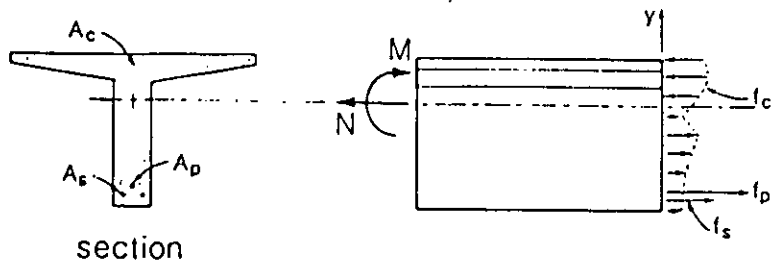
Regangan dari tulangan pada ketinggian y tertentu adalah sama dengan regangan dari beton pada ketinggian tersebut, jadi :

$$\epsilon_B = \epsilon_{cen} - \phi y \quad (3.2)$$

Dalam persamaan-persamaan di atas, telah diasumsikan bahwa regangan tarik adalah positif dan regangan tarik adalah negatif. Dan juga diasumsikan bahwa harga kurvatur, ϕ yang positif, dianggap regangan pada permukaan paling bawah dari penampang lebih besar daripada regangan pada permukaan paling atas dari penampang ($\epsilon_{bottom} > \epsilon_{top}$).

2. SYARAT-SYARAT KESETIMBANGAN

Pada setiap penampang, integrasi tegangan-tegangan pada seluruh bagian dari penampang harus berjumlah sebesar gaya-gaya momen dan normal yang bekerja. Lihat gambar 3.2.



Gambar 3.2. Tegangan-tegangan dan Resultan Tegangan [6]

Jadi :

$$\int f_c dAc + \int f_s dAs = N \quad (3.3)$$

dan

$$\int f_c y dAc + \int f_s y dAs = -M \quad (3.4)$$

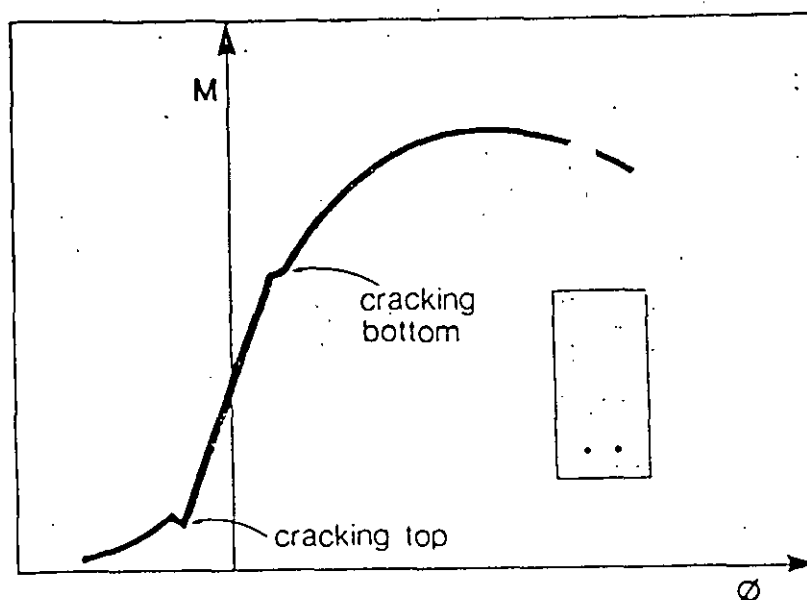
Dalam persamaan-persamaan ini, tegangan tarik berharga positif dan tegangan tekan berharga negatif. Beban aksial, N , adalah positif jika tarik dan negatif jika tekan. Momen, M , adalah positif jika menyebabkan tegangan tarik pada bagian bawah penampang.

3. MEMPERKIRAKAN RESPON DARI PENAMPANG LENTUR

Dapat kita lihat bahwa distribusi regangan beton dapat dicari dengan dua variabel, yaitu regangan pada permukaan paling atas (ϵ_{top}) dan regangan pada permukaan paling bawah (ϵ_{bottom}) dari penampang. Jika distribusi regangan sepanjang penampang diketahui, maka hubungan tegangan-regangan dapat digunakan untuk mencari distribusi tegangan sepanjang penampang. Jika tegangan sepanjang penampang telah diketahui,

maka beban momen dan aksial yang bekerja pada penampang dapat diketahui dari persamaan-persamaan kesetimbangan. Jadi jika kita mengetahui regangan pada permukaan paling atas dan paling bawah dari suatu penampang, kita dapat menghitung beban aksial dan momen yang menyebabkan regangan-regangan tersebut.

Dalam menyelidiki respon lentur murni dari balok-balok (dimana beban aksial adalah nol), perlu untuk menentukan respon momen-kurvatur dari penampang. Cara mencarinya adalah dengan menentukan suatu nilai dari regangan beton paling atas (ϵ_{top}), dan kemudian mencari (dengan cara mencoba-coba) regangan beton paling bawah yang menghasilkan beban aksial sama dengan nol, sehingga momen dan kurvatur yang berhubungan dengan distribusi regangan tersebut dapat ditentukan. Jika perhitungan ini diulang untuk nilai-nilai yang berbeda dari regangan beton paling atas, maka respon momen-kurvatur yang lengkap dari penampang dapat diperkirakan. Lihat gambar 3.3.



Gambar 3.3. Respon Momen Kurvatur [6]

4. TEGANGAN TARIK BETON SETELAH RETAK

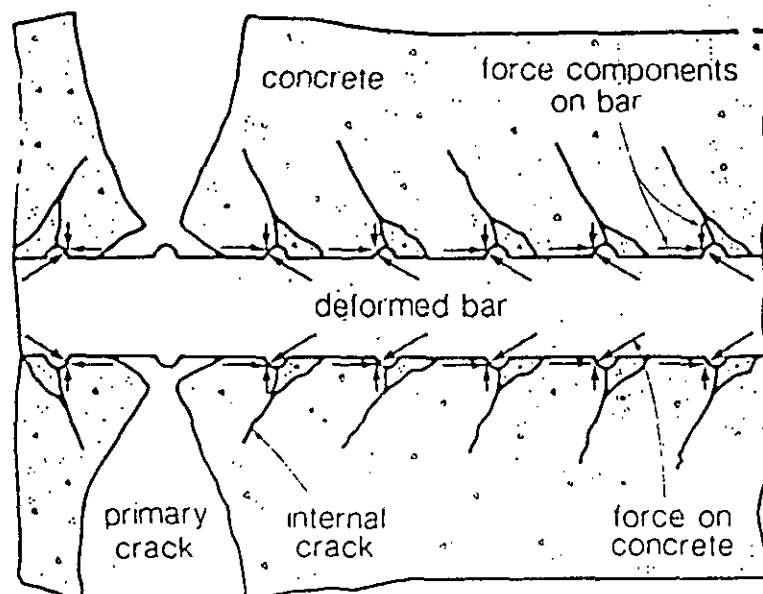
Dalam perhitungan-perhitungan sebelumnya kita selalu mengasumsikan bahwa ketika ketika regangan mencapai regangan retak, ϵ_{cr} , maka tegangan tarik pada beton akan sama dengan nol. Asumsi ini mengabaikan sumbangan dari beton setelah mencapai retak. Jadi ketika beton mencapai retak maka tegangan tarik dianggap dipikul sepenuhnya oleh tulangan tarik yang terpasang.

Pada tahun 1908, Morsch^[15] menjelaskan phenomena tersebut sebagai berikut :

"karena adanya gesekan (friction) antara beton dengan penulangan, dan kekuatan tarik yang masih ada dalam potongan datar di antara retakan, walaupun retak dari beton menurun"

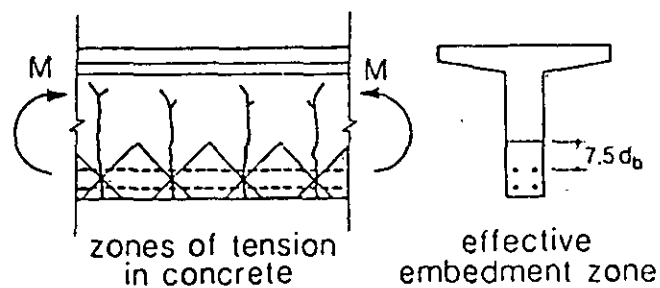
Pengaruh ini dinamakan kekakuan tarik (tension stiffening).

ing).



Gambar 3.4 Formasi dari retakan internal^[11]

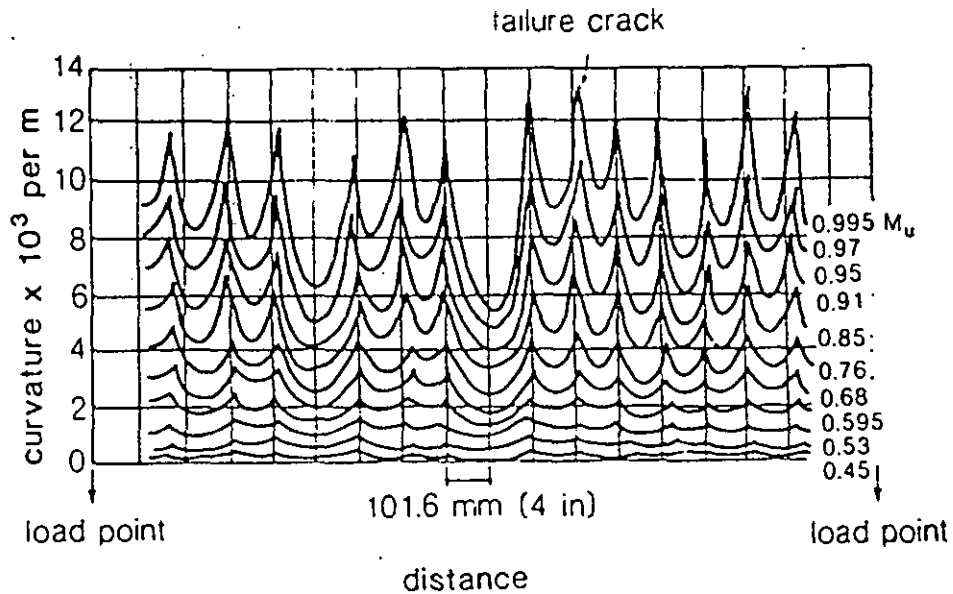
Sebelum mengalami retak, beton sangat efektif dalam menahan tegangan tarik. Setelah retak terbentuk, situasinya menjadi lebih kompleks. Pada sebuah retakan disana tidak ada tegangan tarik, bilamana diantara retakan-retakan tegangan tarik dipindahkan ke dalam beton oleh lekatan penulangan. Lihat gambar 3.5.



Gambar 3.5 Tegangan Tarik dalam Beton Retak^[6]

Sebelum retak-retak terbentuk, panjang balok yang dibebani momen yang konstan, akan memiliki suatu distribusi yang merata dari kurvatur sepanjang bentang. Setelah retak terbentuk, kurvatur setempat akan bervariasi sepanjang bentang dengan kurvatur yang lebih tinggi terjadi pada lokasi retak tersebut. Lihat gambar 3.6.

Tegangan tarik pada penulangan akan menjadi terbesar pada lokasi retak, dimana tarik pada beton adalah nol. Karenanya, kegagalan lentur dari penampang akan cenderung terjadi pada suatu penampang yang mengandung retak. Lihat gambar 3.6. Jadi di dalam menyelidiki kapasitas lentur dari sebuah penampang, cenderung untuk mengabaikan tegangan tarik dalam beton.



Gambar 3.6 Distribusi Kurvatur Terukur pada Daerah Momen Konstan^[6]

Adanya tegangan tarik dalam beton diantara retakan-retakan membuat balok lebih kaku. Untuk menghitung kekakuan tarik (tension stiffening) ini kita dapat menggunakan hubungan tegangan-regangan tarik rata-rata untuk mengestimasi tegangan tarik rata-rata dalam beton setelah retak.

Tegangan tarik beton di antara retakan akan terpusat dalam daerah beton di sekeliling tulangan, yang disebut "effective embedment zone". Lihat gambar 3.5. Karenanya, kita akan mengabaikan tegangan tarik rata-rata dalam beton retak di luar dari "effective embedment zone" tersebut.

Besarnya tegangan tarik pada beton dapat diprediksikan berdasarkan modulus runtuh (modulus of rupture) beton dan berdasarkan "tensile splitting strength" dari beton. Besarnya "modulus of rupture" dan "tensile splitting strength" ini, diambil berdasarkan percobaan dari Carasquilo, Nilson dan Slate^[] yang dinyatakan dalam persamaan-persamaan berikut ini :

$$f_r' = 0.94 \sqrt{f_c'} \quad \text{MPa} \quad (2.7)$$

$$f_{sp}' = 0.54 \sqrt{f_c'} \quad \text{MPa} \quad (2.8)$$

dimana :

f_r' = modulus of rupture

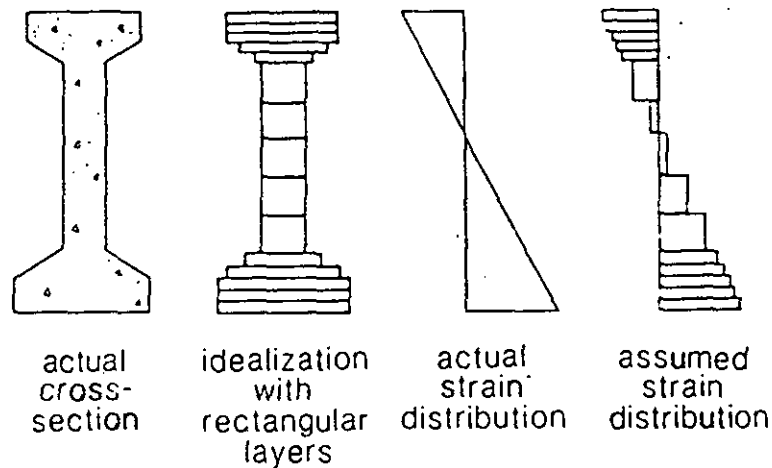
f_{sp}' = tensile splitting strength

Besarnya "tensile splitting strength" ini yang dipakai penulis sebagai nilai tegangan tarik beton dalam menganalisa respon penampang terhadap lentur dengan program RESPONSE.

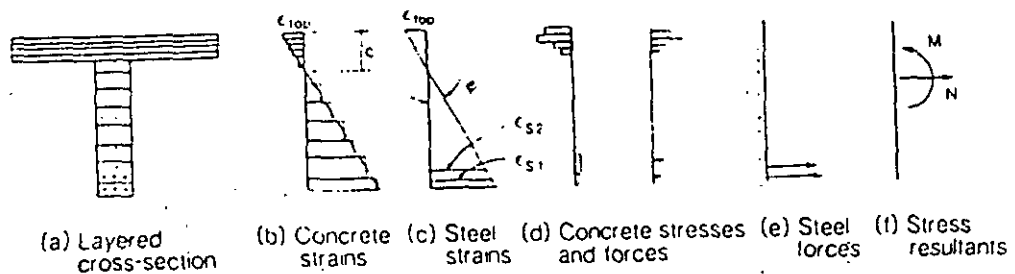
5. EVALUASI LAPISAN DEMI LAPISAN DARI GAYA-GAYA POTONGAN

Suatu cara yang cukup tepat untuk menghitung kapasitas lentur penampang beton bertulang adalah dengan mengidealisasikan potongan melintang penampang sebagai suatu rangkaian dari lapisan-lapisan empat persegi panjang, dan mengasumsikan bahwa regangan dalam tiap lapisan adalah merata dan sama dengan regangan aktual pada pusat dari lapisan. Lihat gambar 3.7. Jika regangan adalah merata sepanjang lapisan, maka tegangan beton juga akan merata sepanjang lapisan. Gaya di dalam tiap lapisan kemudian dapat dicari dengan mengalikan

tegangan dalam lapisan dengan luas dari lapisan, setelah itu kapasitas momen dari penampang dapat diketahui dengan menganalisis gaya lapisan dengan jarak antara tengah-tengah lapisan dan garis netralnya.



Gambar 3.7. Idealisasi lapisan demi lapisan dari penampang^[6]



Gambar 3.8 Evaluasi lapisan demi lapisan^[6]

Cara dimana prosedur lapisan demi lapisan digunakan untuk mengevaluasi gaya-gaya potongan penampang sesuai dengan

distribusi regangan yang diberikan, dapat dilihat pada gambar 3.8. Seperti yang terlihat, resultan-resultan tegangan ditentukan dengan mengevaluasi gaya-gaya di dalam tiap lapisan beton dan tiap lapisan tulangan.

Perhitungan respon momen kurvatur dari penampang beton bertulang dengan menggunakan pendekatan evaluasi lapisan demi lapisan telah dituangkan dalam program RESPONSE^[10], yang nantinya dipakai penulis dalam menganalisa respon penampang beton bertulang terhadap lentur.