

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perilaku Beton Bertulang

Beton bertulang adalah material komposit yang terdiri dari beton dan tulangan baja. Kombinasi kedua material ini menghasilkan struktur yang kuat dan daktail, mampu menahan berbagai jenis beban. Beton kuat terhadap tekan dan lemah terhadap tarik karena retak struktural pada tingkat tegangan yang relatif rendah. Umumnya, beton mengalami sedikit pengerasan atau plastisitas nonlinier, jika ada, sebelum retak atau patah akibat kekuatan tariknya yang lemah. Selain itu, beton memiliki perilaku *brittle* (getas) yaitu keruntuhan yang terjadi secara tiba-tiba jika beban yang bekerja sudah melampaui kekuatan bahan. Oleh karena itu, beton perlu diperkuat dengan baja yang diberi tarik untuk menjembatani retakan dan menahan gaya tarik. Beton dan baja kompatibel secara termal, sehingga ideal untuk material komposit. Baja tulangan memiliki koefisien ekspansi termal sebesar $6,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ ($11,7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), sedangkan beton memiliki koefisien ekspansi termal sebesar $5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ ($9,9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) (Beer dan Johnston 1992).

Lentur pada balok diakibatkan oleh regangan yang timbul karena adanya beban dari luar. Kuat lentur beton bertulang didasarkan pada prinsip dasar bahwa beton kuat dalam menahan gaya tekan, sedangkan baja kuat dalam menahan gaya tarik. Dalam penampang beton bertulang yang mengalami lentur, serat beton di bagian atas akan mengalami tekan, sedangkan serat beton di bagian bawah akan mengalami tarik. Tulangan baja dipasang pada bagian beton yang mengalami tarik untuk menahan gaya tarik tersebut.

Analisis dan desain kapasitas balok beton persegi seringkali menggunakan penyederhanaan berupa blok tegangan Whitney. Blok tegangan ini merepresentasikan distribusi tegangan beton dalam bentuk persegi panjang, sehingga memudahkan perhitungan. Penggunaan penyederhanaan ini diperbolehkan dan sesuai dengan standar nasional SNI 2847-2013. Pada blok tegangan Whitney penggunaan β_1 dapat dihitung berdasarkan nilai f'_c seperti Tabel 2.1.

Tabel 2.1

Nilai β_1 untuk distribusi tegangan beton persegi ekuivalen

f'_c , MPa	β_1	
$17 \leq f'_c \leq 28$	0,85	a)

f'_c , MPa	β_1	
$28 < f'_c < 55$	$0,85 - \frac{0,05(f'_c - 28)}{7}$	b)
$f'_c \geq 55$	0.65	c)

Sumber: Badan Standardisasi Nasional (2019). SNI 2847-2019

Kekakuan beton bertulang adalah kemampuan material ini untuk menahan deformasi atau perubahan bentuk akibat beban yang bekerja. Kekakuan beton bertulang penting untuk memastikan bahwa struktur tidak mengalami lendutan atau defleksi yang berlebihan. Terdapat beberapa faktor utama yang mempengaruhi kekakuan balok beton bertulang terhadap defleksi, seperti Modulus Elastisitas Beton (E_c), Modulus Elastisitas Baja (E_s), rasio tulangan, dan kondisi beban. Dengan menambahkan rasio tulangan, kekakuan dari balok bisa meningkat karena tulangan baja memiliki modulus elastisitas yang tinggi. Semakin besar penampang beton, semakin meningkat juga kekakuan balok karena momen inersia penampang yang lebih besar.

Kekakuan balok akan berpengaruh terhadap kemampuan balok dalam menahan defleksi. Kekakuan balok berbanding terbalik dengan defleksi. Perhitungan defleksi pada balok beton bertulang dimulai dengan perhitungan inersia penampang serta mencari momen retaknya beton.

$$I_g = \frac{1}{12} b h^3 + A y^2 \quad (2.1)$$

$$f_r = 0,62\lambda\sqrt{f'_c} \quad (2.2)$$

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (2.3)$$

dimana:

I_g = Momen inersia gross penampang (mm^4)

b = Lebar balok (mm)

h = Tinggi balok (mm)

A = Luas penampang balok (mm^2)

y = Jarak ke *centroid* balok (mm)

f_r = Modulus hancur beton (tegangan lentur beton) (MPa)

f'_c = Kuat tekan beton (MPa)

λ = faktor modifikasi tipe beton, untuk beton biasa nilainya adalah 1

M_{cr} = Momen retak (Nmm)

y_t = Jarak muka tarik ke sumbu pusat penampang bruto (mm)

Setelah itu, untuk perhitungan defleksi pada tengah bentang balok, diperlukan proses transformasi dimana tulangan tarik dan juga tekan ditransformasikan menjadi beton menggunakan persamaan 2.4. Lokasi garis netral juga perlu dicari dengan menyelesaikan persamaan 2.5 untuk mencari inersia penampang retak dari penampang yang sudah ditransformasi dengan menggunakan persamaan 2.6.

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (2.4)$$

$$nA_s = n A_s \quad (2.5)$$

$$nA_s' = n A_s' \quad (2.6)$$

$$A_{cc} y_c + nA_s y_s + nA_s' y_s' = 0 \quad (2.7)$$

$$A_{cc} \frac{c}{2} + nA_s (c-d) + nA_s' (c-d') = 0 \quad (2.8)$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3} bc^3 + nA_s (c - d)^2 + nA_s' (c - d')^2 \quad (2.9)$$

dimana:

N = Koefisien transformasi

Es = Modulus Elastisitas Baja (MPa)

Ec = Modulus Elastisitas Beton (MPa)

A_s = Luas tulangan baja tarik (mm²)

A_s' = Luas tulangan baja tekan (mm²)

A_{cc} = Luas penampang beton tekan (mm²)

y_c = Jarak titik berat tekan beton sampai garis netral (mm)

nA_s = Luas tulangan tarik setelah transformasi (mm²)

nA_s' = Luas tulangan tekan setelah transformasi (mm²)

c = Jarak serat terluar tekan sampai garis netral (mm)

d = Jarak as tulangan tarik sampai serat tekan terluar (mm)

d' = Jarak as tulangan tekan sampai serat tekan terluar (mm)

Untuk memperhalus transisi antara momen inersia retak penampang yang sudah ditransformasi dengan momen inersia gross, digunakan rumus inersia efektif pada persamaan 2.10.

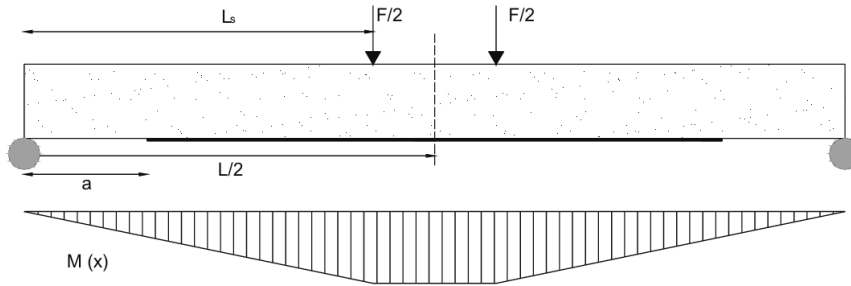
$$I_e = I_g \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 + I_{cr} \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right) \leq I_g \quad (2.10)$$

dimana:

I_e = Inersia efektif penampang (mm⁴)

M_a = Momen yang terjadi (Nmm)

Pada eksperimen yang dilakukan oleh literatur, skema pembebanan yang digunakan adalah *two point load* seperti pada Gambar 2.1. Perhitungan defleksi untuk metode pembebanan tersebut dilakukan menggunakan persamaan 2.11.

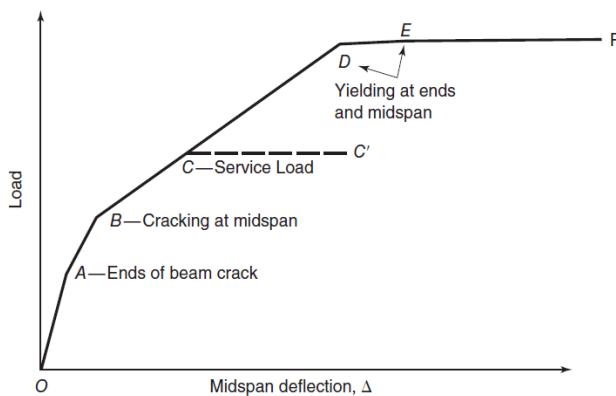


Gambar 2.1 Deskripsi Geometri Skema Pembebanan *Two Point Load*

$$\Delta = \frac{5q_d L_n^4}{384E_c I_e} + \frac{0,5P a}{24 E I_e} (3L_n^2 - 4a^2) \quad (2.11)$$

dimana:

- q_d = Berat sendiri merata (N/mm)
- P = Beban total *two point load* (N)
- E = Modulus Elastisitas Beton (MPa)
- L_a = Jarak terdekat antara tumpuan dengan beban (mm)
- L_n = Bentang bersih (mm)



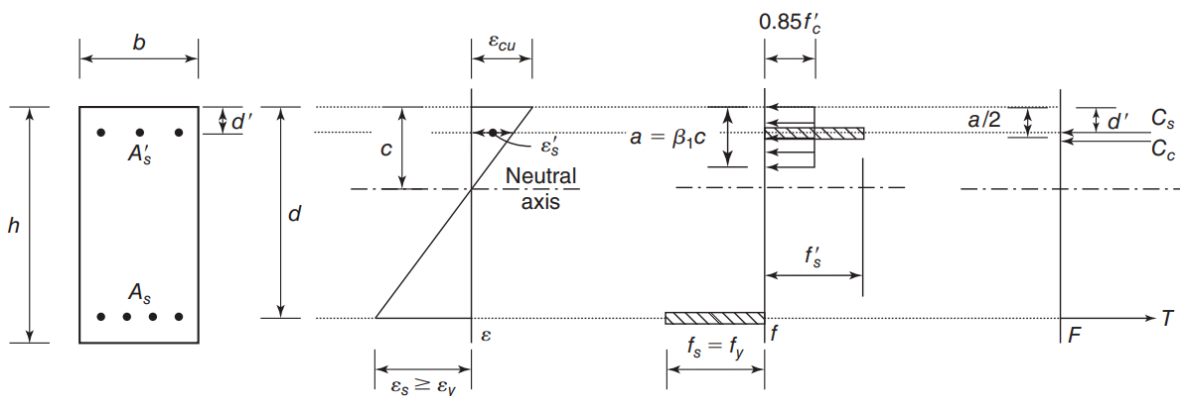
Gambar 2.2 Grafik Hubungan *Load-Deflection* Pada Balok Beton Bertulang

Sumber: Wight, J.K. (2016). *Reinforced Concrete Mechanics and Design Seventh Edition*. Pearson Education Limited

Gambar 2.2 menunjukkan lima tahapan dalam hubungan beban-defleksi balok beton bertulang, yaitu elastis, retak, plastis, *ultimate*, dan keruntuhan. Pada tahap elastis, beton

masih mampu kembali ke bentuk semula setelah beban dihilangkan. Namun, setelah retak, beton kehilangan kemampuannya menahan gaya tarik, sehingga seluruh gaya tarik tersebut dipikul oleh tulangan baja. Tahap plastis dimulai ketika tulangan baja mencapai titik lelehnya. Fase *ultimate* adalah kondisi puncak kapasitas beton bertulang. Setelah fase ini, kapasitas beton terus menurun hingga mencapai titik keruntuhan, yang menandai kehancuran total beton.

Saat merencanakan kapasitas dari balok beton bertulang, digunakan kondisi balok pada saat *ultimate*. Diagram distribusi tegangan dan regangan balok beton bertulang pada kondisi *ultimate* dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Distribusi Tegangan dan Regangan Pada Balok Beton Bertulang

Sumber: Wight, J.K. (2016). *Reinforced Concrete Mechanics and Design Seventh Edition*. Pearson Education Limited

Gaya dalam yang bekerja pada balok beton bertulang dapat dilihat pada persamaan 2.12 hingga 2.14.

$$C_c = 0,85 f'_c a b \quad (2.12)$$

$$C_s = A_{sc} f_{sc} \quad (2.13)$$

$$T_s = A_{st} f_{st} \quad (2.14)$$

dimana:

C_c = Gaya tekan pada beton (N)

Fc' = Kuat tekan beton (MPa)

a = Tinggi blok tegangan tekan (mm)

b = Lebar balok (mm)

C_s = Gaya tekan pada tulangan tekan (N)

A_{sc} = Luas baja tekan (mm²)

- f_{sc} = Tegangan baja tekan (MPa)
 T_s = Gaya tarik pada tulangan tarik (N)
 A_{st} = Luas baja tarik (mm²)
 f_{st} = Tegangan baja tarik (MPa)

Apabila tulangan baja mencapai tegangan leleh, maka nilai $f_{st} = f_y$ dimana f_y adalah nilai tegangan leleh baja tulangan. Kesetimbangan gaya dalam dapat didapatkan melalui persamaan 2.15. Dengan menguraikan persamaan 2.15, didapatkan persamaan 2.16. Kapasitas nominal lentur balok beton bertulang dapat dihitung menggunakan persamaan 2.17.

$$C_c + C_s = T \quad (2.15)$$

$$0,85 f'_c a b + A_{sc} f_{sc} = A_{st} f_{st} \quad (2.16)$$

$$M_n = T_s \left(d - \frac{a}{2} \right) - C_s \left(d' - \frac{a}{2} \right) \quad (2.17)$$

dimana:

M_n = Kapasitas lentur nominal (Nmm)

d = Jarak serat tekan terluar sampai as tulangan baja tarik (mm)

d' = Jarak serat tekan terluar sampai as tulangan baja tekan (mm)

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.13 dan persamaan 2.14 ke persamaan 2.17, rumus kapasitas lentur nominal balok dapat ditulis sebagai:

$$M_n = A_{st} f_{st} \left(d - \frac{a}{2} \right) - A_{sc} f_{sc} \left(d' - \frac{a}{2} \right) \quad (2.18)$$

2.2 Perilaku Perkuatan FRP

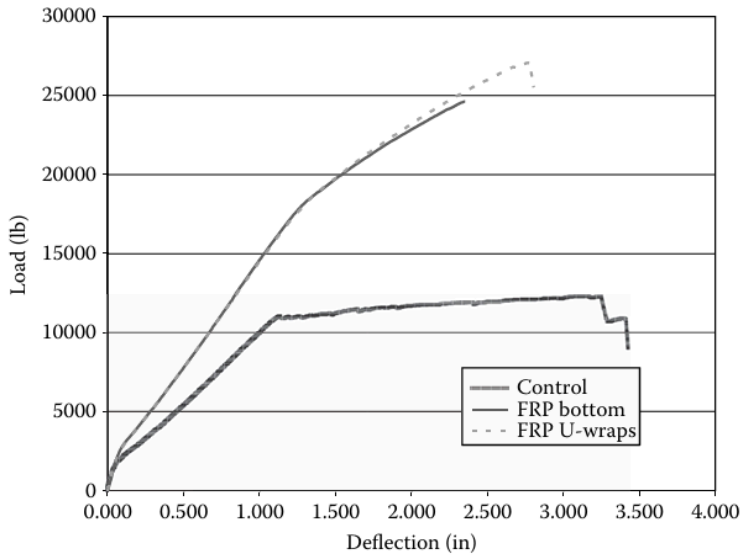
Metode perkuatan EB-CFRP yang dipasang pada permukaan tarik balok beton untuk meningkatkan kapasitas lenturnya telah diperkenalkan oleh Meier (1987). FRP memiliki kekuatan tarik yang jauh lebih tinggi daripada tulangan baja. Pemasangan FRP pada permukaan balok yang mengalami tarik akan membantu beton, sehingga ada perubahan pada tahap elastis, retak, dan *ultimate* (Kevin & Sentosa, 2020). Namun, tindakan perkuatan dengan mengasumsi terjadinya komposit penuh biasanya tergantung pada kekakuan geser jenis perekat (*epoxy*) antarmuka yang digunakan (Rasheed & Pervaiz 2002). *Epoxy* yang digunakan harus memiliki kualitas yang baik agar ada ikatan yang kuat antara beton dengan FRP agar mengarah ke tindakan komposit yang sempurna. Selain itu, *epoxy* yang digunakan harus bisa tahan terhadap cuaca dan lingkungan yang ekstrem untuk memastikan tidak terjadi kegagalan pada *epoxy (debonding)*. Penggunaan *epoxy* yang memiliki kekakuan geser tumpang tindih yang rendah, yang mengarah ke selip ikatan antara FRP dan balok beton, dapat mengurangi interaksi antar material komposit (Rasheed & Pervaiz 2002; Pervaiz & Ehsani 1990). Permukaan

beton juga harus rata dan bersih agar saat dipasang, tidak muncul gelembung udara dan FRP bisa dipasang dengan rata tanpa ada cacat agar tidak melemahkan ikatan (*bond*) antara FRP dengan beton.

Kekuatan material FRP dipengaruhi oleh regangan awal (initial strain) yang terbentuk sebelum pembebanan utama dilakukan. Regangan awal ini berpengaruh terhadap kontribusi yang akan diberikan FRP karena regangan FRP mengandung ε_{bi} . Berdasarkan kode ACI 440.2R-17, ε_{bi} merupakan regangan awal pada saat kondisi elastis dari elemen struktur yang akan diperkuat dengan mempertimbangkan semua beban yang telah terjadi saat pemasangan FRP. Dengan demikian, seluruh beban awal yang diterima oleh struktur balok beton bertulang pada saat pemasangan FRP berpengaruh terhadap regangan awal dari FRP.

Secara kekakuan, CFRP memiliki modulus elastisitas yang mirip dengan tulangan baja sehingga FRP bisa membantu beton dalam mengurangi defleksi yang terjadi. Penambahan FRP pada balok beton bertulang bisa meningkatkan kemampuan balok dalam menahan defleksi, seperti pada Gambar 2.4. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Luastika et al. (2019), balok beton bertulang yang diperkuat dengan FRP mampu mengurangi defleksi dan menahan beban yang lebih besar daripada balok beton bertulang biasa. Menurut Rasheed et al. (2015), dengan interaksi komposit penuh, penggunaan CFRP dapat memberikan kontribusi sedikit dalam meningkatkan kekakuan awal balok karena modulus elastisitasnya yang tinggi sepanjang arah serat.

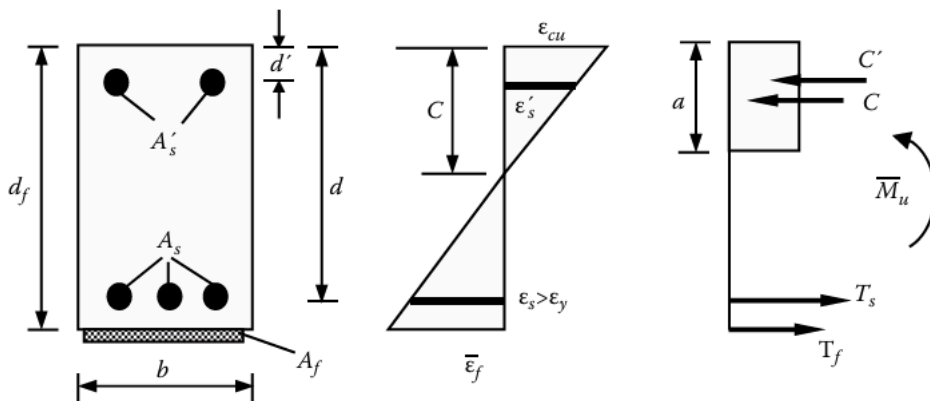
Meskipun demikian, peraturan ACI tidak pernah menerbitkan perhitungan defleksi balok bertulang yang diperkuat dengan EB-FRP. Beberapa penelitian dalam bentuk eksperimen sudah dilakukan dengan mengukur defleksi maksimum yang dapat dipikul balok dan mengusulkan rumus perhitungan defleksi berdasarkan hasil dari eksperimen yang didapatkan. Salah satu penelitian tersebut adalah penelitian yang dilakukan oleh Slaitas et al. (2020). Dari penelitian tersebut, diusulkan rumus yang serupa dengan rumus perhitungan defleksi pada balok beton bertulang biasa dimana FRP ditransformasikan menjadi beton dengan faktor pengali (n) terlebih dahulu agar menjadi satu material dan defleksi bisa dihitung.



Gambar 2.4 Respon balok identik yang tidak diperkuat dan yang diperkuat CFRP menunjukkan kekakuan yang terbatas dibandingkan dengan penguatan.

Sumber: Rasheed, H.A. (2015). *Strengthening Design of Reinforced Concrete with FRP*. CRC Press

FRP yang dipasang pada permukaan bawah balok beton bertulang dapat meningkatkan kekuatan lentur dari elemen struktur tersebut karena FRP bisa membantu beton dalam menahan gaya tarik. Penambahan kekuatan tarik dari FRP dapat dianalisa dengan menambahkan kontribusi FRP pada daerah tarik. Diagram distribusi tegangan dan regangan balok beton bertulang pada kondisi *ultimate* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Distribusi Tegangan dan Regangan Pada Balok Beton Bertulang dengan perkuatan EB-FRP

Sumber: Rasheed, H.A. (2015). *Strengthening Design of Reinforced Concrete with FRP*. CRC Press

Gaya dalam yang bekerja pada balok beton bertulang dengan perkuatan EB-FRP sama seperti balok beton bertulang biasa namun terdapat tambahan gaya tarik pada FRP.

$$T_f = A_f f_f \quad (2.19)$$

Dimana:

T_f = Gaya Tarik pada FRP (N)

A_f = Luas FRP (mm²)

f_f = Tegangan FRP (MPa)

Sehingga persamaan kesetimbangan gaya dalam yang didapat adalah:

$$C_c + C_s = T_s + T_f \quad (2.20)$$

$$0,85 f'_c a b + A_{sc} f_{sc} = A_{st} f_{st} + A_f f_f \quad (2.21)$$

Apabila tegangan FRP mencapai tegangan batasan *debonding* ataupun *failure* maka $f_f = f_{fd}$ atau $f_f = f_{fu}$ tergantung mode kegagalan yang dialami oleh FRP. Tegangan f_{fd} menunjukkan batas saat FRP mengalami kegagalan *debonding*, sedangkan tegangan f_{fu} mengindikasikan saat FRP mencapai kegagalan akibat rupture. Nilai tegangan *debonding* bisa dihitung berdasarkan rumus ACI 440.2R-17 (American Concrete Institute, 2017).

$$f_{fd} = 0,41 E_f \sqrt{\frac{f'_c}{n E_f t_f}} \leq 0,9 f_{fu} \quad (2.22)$$

dimana:

f_{fd} = Batas Tegangan *Debonding* FRP (MPa)

E_f = Modulus Elastisitas FRP (MPa)

n = Jumlah lapis FRP yang dipasang

t_f = Tebal FRP yang digunakan (mm)

f_{fu} = Mutu FRP (MPa)

Pada perhitungan kapasitas lentur nominal penampang balok beton bertulang dengan perkuatan EB-FRP, kekuatan tambahan dari FRP perlu dikalikan faktor Ψ_f . Faktor Ψ_f ini diambil sebesar 0,85 berdasarkan analisis keandalan nilai statistik yang dikalibrasi secara eksperimental terutama untuk memperhitungkan mode kegagalan delaminasi lembaran FRP yang kurang dapat diprediksi (Okeil et al., 2007):

$$M_n = T_s \left(d - \frac{a}{2}\right) - C_s \left(d' - \frac{a}{2}\right) + \Psi_f T_f \left(d_f - \frac{a}{2}\right) \quad (2.23)$$

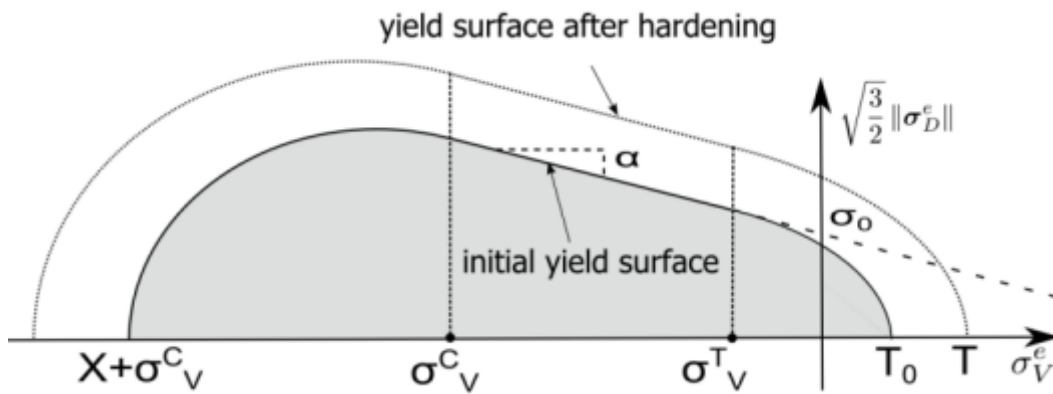
$$M_n = A_{st} f_{st} \left(d - \frac{a}{2}\right) - A_{sc} f_{sc} \left(d' - \frac{a}{2}\right) + \Psi_f A_f f_f \left(d_f - \frac{a}{2}\right) \quad (2.24)$$

dimana:

d_f = Jarak serat tekan terluar sampai as FRP (mm)

2.3 Model Beton

Beton adalah material kompleks dengan perilaku non-linear yang memiliki kapasitas tekan yang sangat tinggi, tetapi memiliki kapasitas tarik yang lemah dan daktilitas yang rendah. Perilaku beton umumnya melibatkan mekanisme keretakan, dimana terbentuk retakan yang dapat menyebabkan penurunan kekakuan dan menghasilkan kurva tegangan-regangan yang tidak lagi bersifat linier. Terdapat beberapa model yang umum digunakan dalam menganalisis perilaku *nonlinear* beton ini yaitu: model Drucker-Prager, Mohr-Coulomb, dan juga Menetrey-Willam. Model beton yang digunakan adalah beton *non-linear* dengan pendekatan model Microplane dengan *Drucker-Prager Cap Yield Function (Microplane DPC)*.



Gambar 2.6 Grafik Microplane Dengan *Drucker-Prager Cap Yield Function*

Sumber: ANSYS(2025). *Microplane Material Models*

Fungsi ini merupakan kriteria Drucker–Prager yang umum digunakan, namun ditingkatkan dengan dua batasan (*cap*) yaitu: *compression cap* dan *tension cap*. Luasan grafik tersebut menggunakan tiga permukaan (*three-surface*).

Permukaan pertama adalah permukaan Drucker–Prager klasik yang memodelkan respon material terhadap tekanan hidrostatis dan tegangan dengan koefisien kohesi dan friksi. Permukaan kedua adalah *compression cap* yang membatasi area *yield* di bawah beban tekan tinggi. Permukaannya dirancang menyatu secara halus dengan permukaan utama sehingga tidak terjadi ketidakteraturan numerik. Permukaan terakhir adalah *tension cap* yang membatasi deformasi plastis saat material mengalami gaya tarik, juga dicocokkan secara halus terhadap permukaan Drucker–Prager.

Pemodelan *Microplane Drucker-Prager Cap Yield Function* memerlukan sejumlah *input parameter* untuk mendefinisikan respons material secara menyeluruh. Tabel 2.1 menyajikan

daftar parameter yang dibutuhkan beserta keterangan masing-masing variabel yang harus dimasukkan ke dalam model.

Tabel 2.2

Parameter *Microplane Model Dengan Drucker Prager Cap Yield Function*

Notasi	Keterangan
E	Modulus Elastisitas (MPa)
nu	Poisson's ratio
f_{uc}	Kuat tekan uniaxial beton, f'_c (MPa)
f_{bc}	Kuat tekan biaksial beton (MPa)
f_{ut}	Kuat tarik beton (MPa)
σ_v^c	Absis titik perpotongan antara <i>compression cap</i> dan <i>Drucker-Prager yield function</i>
R	Rasio antara sumbu mayor dan minor dari cap
D	Konstanta material <i>hardening</i>
R_T	Konstanta <i>Tension cap hardening</i>
γ_{t0}, γ_{c0}	Batas dimulainya kerusakan tarik dan tekan
β_t, β_c	Konstanta evolusi kerusakan tarik dan tekan
c	Parameter range interaksi nonlocal
m	Parameter merata-rata over-nonlocal

Sumber: Ansys (2025). *Microplane Material Models*

Untuk mengetahui nilai dari setiap parameter, diperlukan beberapa rumus.

Berdasarkan Ansys (2025), rumus-rumus yang diperlukan antara lain adalah:

$$f_{bc} = 1,15f_{uc} \quad (2.25)$$

$$f_{ut} = 1,4 \left(\frac{f_{uc}}{10} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.26)$$

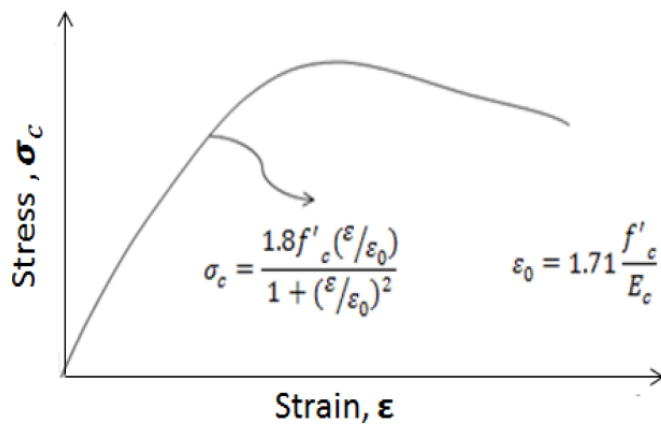
$$\sigma_v^c = -\frac{2}{3}f_{bc} \quad (2.27)$$

$$\beta_t = 1,5\beta_c \quad (2.28)$$

Berdasarkan persamaan 19.2.2.1.b dari peraturan ACI 318-19 (*American Concrete Institute, 2019*), modulus elastisitas beton dapat dihitung menggunakan persamaan 2.29:

$$E_c = 4.700\sqrt{f'_c} \quad (2.29)$$

Selain itu, terdapat beberapa parameter yang umumnya digunakan dengan nilai tetap secara konsisten. Parameter-parameter tersebut antara lain R_T yang biasanya diinput dengan nilai 1, γ_{t0} sebesar 0, serta m sebesar 2.5. Untuk nilai D , β_c , dan γ_{c0} dikalibrasi agar model diagram tegangan-regangan beton sesuai dengan model perilaku beton yang dikembangkan oleh Todeschini et al. (1964). Diagram tegangan-regangan yang dihasilkan dari model beton Todeschini dapat dilihat pada Gambar 2.7.

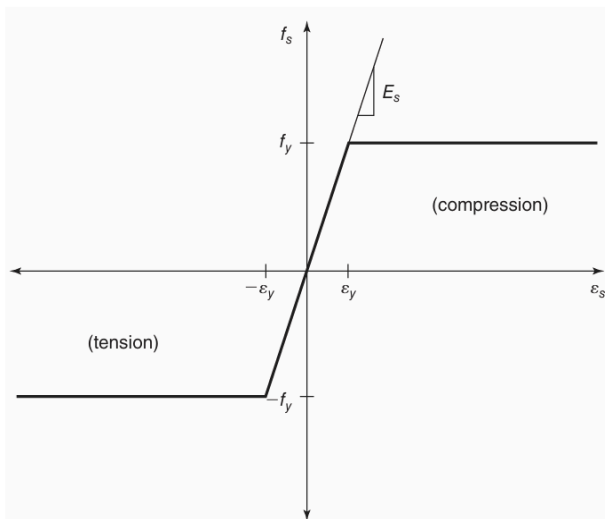


Gambar 2.7 Diagram Tegangan-Regangan Model Beton Todeschini

Sumber: Todeschini et al. (1964). *Behavior of concrete columns reinforced with high strength steels*

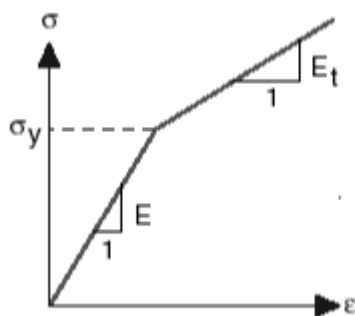
2.4 Model Material Tulangan/Baja

Dalam struktur beton bertulang, tulangan baja memainkan peran yang sangat penting dalam mencegah keruntuhan struktur. Tulangan baja dalam beton bertulang berperan membantu beton dalam menahan gaya tarik yang diterima, meningkatkan daktilitas, mengendalikan penyebaran retakan, dan meningkatkan kekuatan struktur. Terdapat beberapa pemodelan tulangan baja yang umum digunakan, seperti elastis-plastis sempurna, *bilinear plasticity* (plastisitas bilinear), dan *multilinear plasticity* (plastisitas multilinear). Model elastis-plastis sempurna mengasumsikan bahwa baja berperilaku *linear* elastik hingga mencapai *yield stress* (tegangan leleh), sedangkan *bilinear plasticity* dan *multilinear plasticity* merupakan perbaikan dari model elastis-plastis sempurna yang dapat mempertimbangkan efek pengerasan regangan pada baja.



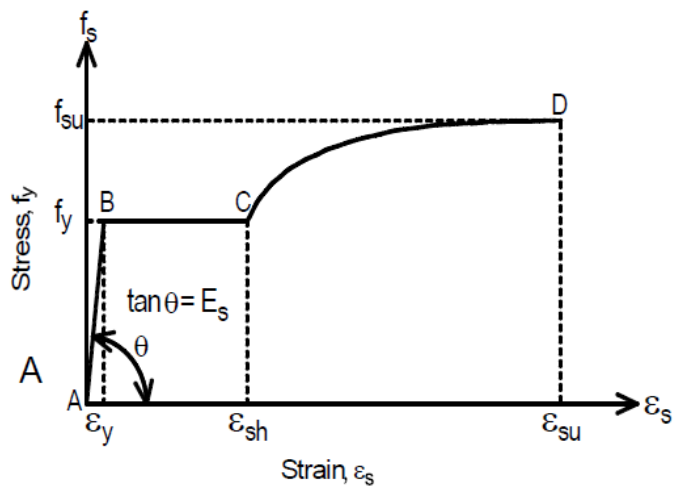
Gambar 2.8 Model Diagram Elastis Plastis Sempurna

Sumber: Wight, J.K. (2016). *Reinforced Concrete Mechanics and Design Seventh Edition*. Pearson Education Limited.



Gambar 2.9 Model Diagram Plastisitas *Bilinear*

Sumber: Dassault Systèmes (2015). *Plasticity von Mises Model*



Gambar 2.10 Model Diagram Plastisitas *Multilinear*

Sumber: Tavio & Tata (2008). *Stress-Strain Relation and Nonlinear Behavior Of Circular Confined Reinforced Concrete Columns*

Dalam pemodelan balok beton bertulang dengan metode FEM, model plastisitas *multilinear* dianggap sebagai pendekatan yang paling tepat dalam merepresentasikan tulangan baja. Hal ini dikarenakan model ini memungkinkan pendefinisian beberapa titik regangan dan tegangan setelah leleh, sehingga dapat menggambarkan perilaku nonlinier tulangan baja secara lebih akurat. Model plastisitas *multilinear* dapat mencerminkan perilaku *post-yield* dari tulangan yang akan masuk ke dalam tahap plastis dan terus mengalami deformasi plastis dengan peningkatan tegangan secara bertahap.

Pada pemodelan plastisitas *multilinear*, digunakan model Park and Paulay (1975). Pada Gambar 2.10, dapat terlihat bahwa model ini memiliki 3 area yaitu area A-B (elastis *linear*), B-C (tahap leleh) dan C-D (*strain hardening*). Untuk pemodelan sifat *multilinear* ini, digunakan rumus dari Tavio dan Tata (2008). Untuk area A-B, digunakan rumus:

$$f_s = \varepsilon_s E_s \quad (2.35)$$

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \quad (2.36)$$

Untuk Area B-C digunakan rumus:

$$f_s = f_y \quad (2.37)$$

$$\varepsilon_{sh} = 16\varepsilon_y \quad (2.38)$$

Untuk Area C-D digunakan rumus:

$$r = \varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh} \quad (2.39)$$

$$m = \frac{\left(\frac{f_{su}}{f_y}\right)(30r + 1)^2 - 60r - 1}{15r^2} \quad (2.40)$$

$$f_s = f_y \left[\frac{m(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) + 2}{60(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh})(60 - m)}{2(30r + 1)^2} \right] \quad (2.41)$$

dimana:

f_s = Tegangan Baja Tulangan (MPa)

f_y = Tegangan leleh Baja Tulangan (MPa)

ε_s = Regangan Baja Tulangan

ε_y = Regangan Leleh Baja Tulangan

E_s = Modulus Elastisitas Baja Tulangan (MPa)

2.5 Model Material FRP

Fiber Reinforced Polymer (FRP) adalah material komposit yang telah digunakan sebagai perkuatan struktur beton bertulang mulai dari pertengahan tahun 1980. FRP dapat terbuat dari 3 (tiga) bahan komposit, yaitu Carbon, Glass, dan Aramid. Material ini memiliki massa jenis yang sangat ringan dan modulus elastisitas yang lebih tinggi dari tulangan baja, sehingga balok beton bertulang yang diperkuat dengan FRP umumnya masih memiliki kapasitas yang tersimpan saat tulangan telah mencapai mencapai tahap leleh.

Keunggulan dari FRP mencakup properti daktilitas yang tinggi, berat yang ringan sehingga tidak memerlukan peralatan yang berat untuk membawanya ke lokasi, dan mudah dalam proses pemasangan karena tidak mengganggu aktivitas yang ada pada daerah perbaikan struktur tersebut (Phalguni Mukhopadhyaya, dan NarayanSwamy, 2001). Namun, material ini relatif lebih mahal dibandingkan dengan material perkuatan beton bertulang lainnya. Teknik perkuatan menggunakan FRP adalah dengan cara melilitkannya mengelilingi permukaan perimeter atau menempelkannya pada bagian bawah elemen struktur yang mengalami gaya tarik dengan menggunakan perekat epoxy resin.

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) adalah salah satu kategori FRP yang memiliki properti bahan yang sangat kuat, ringan, dan serbaguna. Material ini terdiri atas serat karbon dan matriks polimer yang mana serat yang mengandung setidaknya berbobot 90% dari berat karbon. Fungsi utama perkuatan dengan sistem CFRP dalam dunia konstruksi adalah untuk meningkatkan kekuatan atau memberikan peningkatan kapasitas lentur, geser, axial, daktilitas, dan ketahanan terhadap fatigues (Achmad et al., 2012). CFRP tidak mengalami korosi seperti

baja, sehingga cocok untuk digunakan di lingkungan yang keras. CFRP memiliki ketahanan yang baik terhadap kelelahan, sehingga dapat digunakan untuk aplikasi yang mengalami siklus pembebanan berulang. CFRP dapat dibentuk menjadi berbagai macam bentuk dan ukuran, memungkinkan fleksibilitas desain yang tinggi.

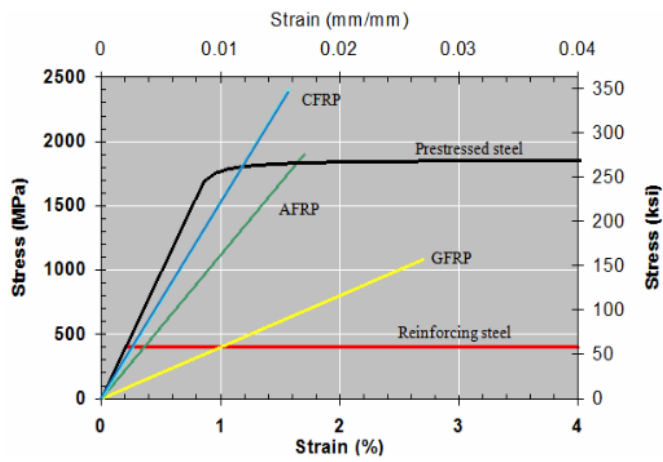
Dalam penerapannya, terdapat beberapa macam mode kegagalan yang dapat terjadi pada balok beton yang diperkuat dengan FRP, antara lain *ductile crushing of concrete* (hancurnya beton secara daktil), *brittle crushing of concrete* (beton hancur sebelum perkuatan tulangan mencapai kapasitas leleh), *FRP rupture* (putusnya serat FRP), *cover delamination* (lepasnya lapisan beton penutup), dan *FRP debonding* (lepasnya FRP dari permukaan beton). Mode-mode kegagalan ini sangat bergantung pada kualitas pelaksanaan, sifat material, dan kondisi pembebanan, sehingga menjadi pertimbangan penting dalam perencanaan dan pemodelan.

FRP adalah material komposit anisotropik, yang berarti sifat mekaniknya berbeda dalam arah serat dan arah tegak lurus serat. Model material FRP yang umum digunakan adalah model *isotropic elastic*, *orthotropic elastic*, dan *anisotropic elastic*. Pemodelan *orthotropic elastic* memungkinkan pengguna untuk mendefinisikan sifat material FRP yang berbeda dalam tiga arah ortogonal sesuai arah serat, sedangkan *anisotropic elastic* mampu mendefinisikan sifat material yang berbeda dalam semua arah. Namun, kasus ini menggunakan material FRP model *orthotropic elastic* dengan asumsi bahwa FRP berperilaku sangat kuat dan kaku hanya pada arah sejajar dengan balok (arah X) karena beban ditahan oleh serat.

Penelitian yang dilakukan Shrestha (2009) dan Obaidat (2010) menunjukkan bahwa sifat pada arah melintang FRP, yang hanya sekitar 1% dari sifat sepanjang serat, dapat diabaikan dalam matriks kekakuan. Oleh karena itu, dalam FEM ini, FRP diasumsikan sebagai material *orthotropic* dan elastis *linear* dengan sifat material yang lemah pada arah Y dan Z karena hanya ditahan oleh matriks resin, sehingga nilai *input* bagi parameter material pada kedua arah tersebut dibuat sangat kecil (mendekati nol) untuk mengabaikan kekakuan arah lainnya. Gambar 2.11 menggambarkan diagram hubungan tegangan-regangan dari seluruh jenis FRP berdasarkan materialnya.

Parameter material FRP yang dibutuhkan meliputi modulus elastisitas (E), rasio Poisson (ν), modulus geser (G). Nilai modulus geser dapat dihitung menggunakan persamaan 2.38 dengan memasukkan angka dari modulus elastisitas spesimen dan juga rasio Poisson yang dikehendaki.

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (2.38)$$



Gambar 2.11 Diagram Hubungan Tegangan-Regangan Berbagai Jenis FRP (Quayyum, 2010)