

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	45
A. Hasil Pengujian Karakteristik Material	45
1. Karakteristik mekanis beton.....	45
2. Karakteristik mekanis tulangan <i>GFRP Bar</i> dan <i>GFRP Sheet</i>	46
B. Hasil Analisa Balok Beton Bertulang	47
1. Kapasitas momen dan beban	47
2. Hubungan beban dan lendutan	50
2.1. Hubungan beban dan lendutan balok tulangan tarik <i>GFRP bar</i> dengan tulangan geser baja (BK)	51
2.2. Hubungan beban dan lendutan balok tulangan tarik <i>GFRP bar</i> & tulangan geser eksternal <i>GFRP sheet</i> lebar 50 mm (BFGS50)	52
2.3. Hubungan beban dan lendutan balok tulangan tarik <i>GFRP bar</i> & tulangan geser eksternal <i>GFRP sheet</i> lebar 100 mm (BFGS100)	54
3. Hubungan beban dan regangan beton	57
4. Hubungan beban dan regangan baja.....	58
5. Pola retak dan mode kegagalan.....	61
5.1. Pola retak.....	61
5.2. Mode kegagalan	65
BAB V PENUTUP.....	72
A. KESIMPULAN	72
B. SARAN	73
DAFTAR PUSTAKA	74
LAMPIRAN.....	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Kerusakan pada beton akibat korosi tulangan baja.....	2
Gambar 2. Jumlah tulangan yang terlindungi dari korosi (<i>corrosion protected rebars market: 2010-2011</i>).	2
Gambar 3. Diagram tegangan dan regangan balok beton bertulang.	3
Gambar 4. Ilustrasi proses pembuatan balok beton bertulangan GFRP tanpa.....	5
Gambar 5. Diagram keruntuhan balok	13
Gambar 6. Distribusi regangan dan tegangan pada batang lentur yang menggunakan tulangan <i>FRP</i>	14
Gambar 7. Diagram alir penelitian.....	34
Gambar 8. Dimensi balok uji	36
Gambar 9. Dimensi dan penulangan balok BK.....	37
Gambar 10. Dimensi dan penulangan balok BFGS50	38
Gambar 11. Dimensi dan penulangan balok BFGS100	39
Gambar 12. Jumlah dan posisi <i>strain gauge</i> pada tulangan tarik Balok BK & BFGS50.....	40
Gambar 13. Jumlah dan posisi strain gauge pada tulangan tarik dan BFGS100 ..	40
Gambar 14. Skema Pengujian Balok	44
Gambar 15. Pengujian sifat mekanis beton.....	45
Gambar 16. Beban ultimate sampel	48
Gambar 17. Hubungan beban dan lendutan balok tulangan tarik <i>GFRP bar</i> dan tulangan geser baja (BK).....	51
Gambar 18. Hubungan beban - lendutan pada kondisi <i>crack</i> awal balok BK	52

Gambar 19. Hubungan beban dan lendutan balok tulangan tarik <i>GFRP bar</i> dan tulangan geser eksternal <i>GFRP sheet</i> (BFGS50).....	53
Gambar 20. Hubungan beban dan lendutan pada kondisi <i>crack</i> awal balok BFGS50	53
Gambar 21. Hubungan beban dan lendutan balok tulangan tarik <i>GFRP bar</i> dan tulangan geser eksternal <i>GFRP sheet</i> (BFGS100).....	54
Gambar 22. Hubungan beban dan lendutan pada kondisi <i>crack</i> awal balok BFGS100.....	55
Gambar 23. Hubungan beban dan lendutan semua benda uji	55
Gambar 24. Hubungan beban dan regangan beton pada tiap variasi	57
Gambar 25. Hubungan beban dan regangan baja pada tiap variasi	59
Gambar 26. Pola retak balok BK – A	61
Gambar 27. Pola retak balok BK – B.....	62
BFGS50 - A.....	62
Gambar 28. Pola retak balok BFGS50 – A.....	62
Gambar 29. Pola retak balok BFGS50 – B	63
Gambar 30. Pola retak balok BFGS100 – A.....	63

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Variasi dan jumlah sampel balok beton bertulang	37
Tabel 2. Jumlah <i>strain gauge</i> pada balok BK	41
Tabel 3. Jumlah Jumlah <i>strain gauge</i> pada balok BF	41
Tabel 4. Jumlah <i>strain gauge</i> pada balok BFGS100.....	41
Tabel 5. Nilai mekanis beton	46
Tabel 6. Karakteristik mekanis tulangan <i>GFRP Bar</i> diameter 13 mm	46
Tabel 7. Karakteristik mekanis <i>GFRP Sheet</i> tipe SEH51	47
Tabel 9. Kapasitas momen dan beban eksperimental pada kondisi <i>crack</i> dan <i>ultimate</i>	47
Tabel 10. Beban, lendutan dan kekakuan BK, BFGS50, BFGS100 pada retak awal	56
Tabel 11. Beban, lendutan dan kekakuan BK, BFGS50, BFGS100	56
Tabel 12. Rekapitulasi mode keruntuhan semua variasi balok.....	71

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Beton bertulang (*reinforced concrete*) merupakan struktur campuran yang sangat baik digunakan pada konstruksi bangunan. Struktur beton bertulang memiliki banyak keunggulan, dikarenakan memiliki kombinasi dua bahan yaitu, beton dan baja sebagai tulangan, dimana beton memiliki kuat tekan yang tinggi, sedangkan baja sebagai tulangan sangat tahan terhadap tegangan tarik dan geser dan menjadikan struktur bangunan menjadi lebih kuat dan aman.

Struktur beton bertulang dengan tulangan baja yang ditempatkan di daerah pesisir atau laut tidak dapat terhindar dari paparan air laut, sehingga rentan terhadap kerusakan atau kehilangan kekuatan akibat korosi.

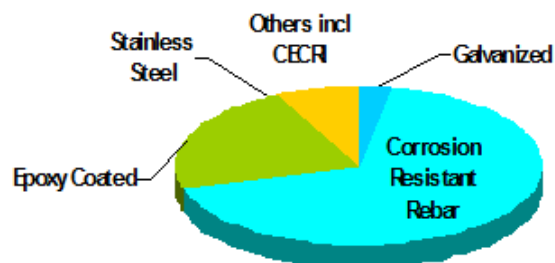
Korosi adalah reaksi elektrokimia yang terjadi secara alamiah, dan merupakan salah satu faktor utama yang menyebabkan penurunan kekuatan dan kerusakan struktur suatu bangunan. Pengaruh yang disebabkan oleh korosi bersifat destruktif terhadap suatu bangunan seperti terlihat pada **Gambar 1**. Korosi disebabkan oleh karbonasi dan kontaminasi klorida. Korosi dapat menyebabkan pengurangan luas penampang tulangan dan dapat menurunkan kemampuan layan struktur. Disamping mengurangi luas penampang tulangan, korosi juga dapat menyebabkan retakan dan pemisahan selimut beton (*spalling*) (Balafas & Burgoyne, 2010). Korosi tulangan baja mengurangi ketahanan lentur (Torres-

Acosta et al., 2007) dan ketahanan geser (L. Wang et al. 2015) penampang beton bertulang.



Gambar 1. Kerusakan pada beton akibat korosi tulangan baja.

Beberapa cara telah diterapkan untuk mengatasi masalah korosi pada tulangan seperti penggunaan *cathodic protection*, *epoxy coating*, galvanisasi, serta penggunaan tulangan tahan korosi. Data yang dipublikasikan oleh Frost and Sullivan berdasarkan survey tahun 2010 sampai tahun 2011 menunjukkan bahwa penggunaan tulangan tahan korosi mendominasi pasar untuk mengatasi masalah korosi pada tulangan beton (Sathyamoorthy, 2011) seperti yang terlihat pada **Gambar 2.**

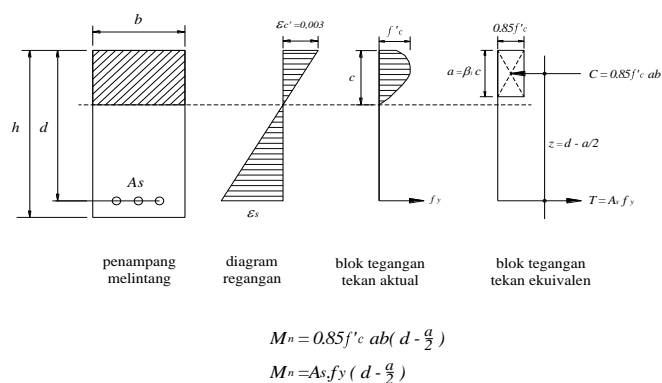


Source: Frost & Sullivan

Gambar 2. Jumlah tulangan yang terlindungi dari korosi (*corrosion protected rebars market: 2010-2011*).

Penggunaan tulangan tahan korosi pada elemen struktur beton bertulang khususnya pada kondisi lingkungan yang agresif untuk meningkatkan umur struktur dan mengurangi biaya perawatan selama masa layan semakin meningkat. Salah satu material yang dikembangkan sebagai tulangan struktur beton bertulang adalah material *FRP* (*Fiber Reinforced Polymer*) dalam bentuk tulangan (*bar*) yang berbahan dasar gelas (*GFRP Bar*). Selain tahan korosi, *GFRP Bar* juga memiliki kekuatan yang tinggi, tidak terpengaruh magnet, memiliki ketahanan fatik yang baik, ringan, daya hantar panas dan listrik yang rendah (ACI 440.1R-03, 2003).

Besarnya momen lentur nominal penampang beton bertulang (M_n) dipengaruhi oleh panjang lengan momen yang jaraknya dihitung dari as tulangan tarik ke titik berat penampang beton tertekan, luas penampang dan mutu tulangan, serta mutu beton yang digunakan. Hubungan tegangan dan regangan balok beton bertulang serta momen nominal penampang dapat dilihat pada **Gambar 3**. Berdasarkan ilustrasi Gambar 3, lengan momen (d) sangat tergantung pada tebal selimut beton. Penambahan tebal selimut beton untuk melindungi tulangan dari lingkungan yang korosif dapat mengurangi kapasitas momen penampang atau menambah dimensi penampang.

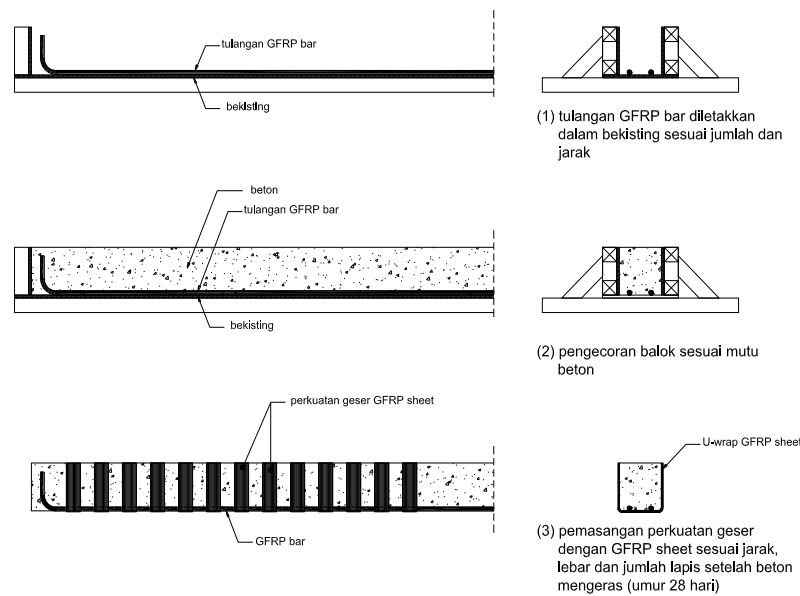


Gambar 3. Diagram tegangan dan regangan balok beton bertulang.

Mengingat potensi yang dimiliki oleh *GFRP Bar* sebagai tulangan tahan korosi, maka tulangan *GFRP Bar* memungkinkan untuk digunakan sebagai tulangan luar tanpa selimut beton. Jika selimut beton dihilangkan, maka tinggi penampang, volume beton dan berat struktur dapat dikurangi, tanpa mengurangi tinggi efektif penampang.

Teknologi perkuatan struktur menggunakan bahan *FRP* pada struktur beton saat ini terdiri dari perkuatan luar berupa *FRP Sheet* yang direkatkan dengan resin pada permukaan beton dan *FRP Bar* atau *FRP Strip* yang dipasang pada alur yang telah disiapkan pada permukaan beton dan direkatkan dengan resin (*Near Surface Mounted*). (Chennareddy & Taha, 2017) menguji pengaruh penggabungan metode *NSM FRP Bar* dan *U-Wrap FRP Sheet* terhadap perilaku lentur balok beton bertulang pada pembebanan statik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tambahan metode *U-Wrap* pada metode *NSM* meningkatkan kapasitas lentur balok. Penggunaan bahan *FRP Sheet* dalam perbaikan ataupun perkuatan struktur tidak membutuhkan energi yang besar seperti bahan-bahan konvensional.

Dengan memanfaatkan kelebihan tulangan *GFRP Bar* dan kemudahan penggunaan *GFRP Sheet*, maka dibuat inovasi struktur beton bertulang dengan sistem tulangan luar tanpa selimut beton. Pelaksanaan pekerjaan pengecoran beton dengan metode ini sangat mudah di mana tulangan *GFRP* hanya diletakkan di atas bekisting kemudian dicor tanpa perakitan tulangan. Penahan geser pada balok selanjutnya diberikan setelah beton mengeras dengan metode *U-Wrap GFRP Sheet* sesuai kapasitas geser yang dibutuhkan. Ilustrasi pembuatan balok dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Ilustrasi proses pembuatan balok beton bertulangan GFRP tanpa selimut beton dengan *GFRP Sheet* sebagai kekuatan geser.

Balok beton bertulang tanpa selimut tentunya akan mengalami penurunan kapasitas lentur mengingat rekatan antara tulangan dan beton juga berkurang. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kekuatan rekatan tulangan *FRP Bar* dengan beton lebih rendah dari tulangan besi dan berkurangnya tebal selimut beton juga menurunkan kekuatan rekatan tulangan dengan beton (Veljkovic, Carvelli, Haffke, & Pahn, 2017). Pemasangan *GFRP-Sheet* selain sebagai penahan geser juga diharapkan memberikan efek kekangan pada beton sehingga meningkatkan lekatan tulangan dengan beton. Berdasarkan model yang dibuat sebagai sebuah inovasi dalam konstruksi beton bertulang maka perlu diadakan penelitian dengan judul “Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang *GFRP Bar* dengan Tulangan geser eksternal”

B. Rumusan Masalah

1. Bagaimana kapasitas lentur pada balok beton bertulang *GFRP Bar* dengan tulangan geser eksternal *GFRP Sheet*.
2. Bagaimana pola retak dan keruntuhan pada balok beton bertulang *GFRP Bar* dengan tulangan geser eksternal *GFRP Sheet*.

C. Tujuan

1. Menganalisis kapasitas lentur pada balok beton bertulang *GFRP Bar* dengan tulangan geser eksternal *GFRP Sheet*.
2. Menganalisis pola retak dan pola keruntuhan balok beton bertulang *GFRP Bar* dengan tulangan geser eksternal *GFRP Sheet*.

D. Ruang Lingkup

1. Sampel balok beton bertulang (*GFRP Bar*) untuk pengujian lentur statik monotonik dengan ukuran penampang 150 mm x 250 mm dan panjang 3300 mm.
2. Mutu beton yang digunakan dalam penelitian ini adalah mutu beton normal dengan $f'c = 25$ MPa.
3. Tulangan yang dipakai pada balok beton bertulang untuk pengujian lentur statik monotonik yaitu:
 - Tulangan tarik : *GFRP Bar* D13
 - Tulangan geser : baja $\varnothing 8$, *GFRP Sheet* tebal 1.3 mm
4. Tidak dilakukan uji tarik *GFRP Bar* dan *GFRP Sheet*, digunakan data karakteristik mekanis dari produsen.

5. Desain balok beton bertulang *GFRP Bar* mengacu pada standar ACI-440-1R-06 dan ACI-440-2R-08. Desain balok beton bertulang baja mengacu pada standar ACI-318-99.

E. Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan yang ingin dicapai, maka manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini adalah:

1. Terciptanya inovasi sistim penulangan beton bertulang yang lebih maksimal dalam memikul beban lentur dan memiliki ketahanan yang tinggi terhadap lingkungan yang korosif.
2. Desain konstruksi beton bertulang yang lebih hemat bahan dan memiliki daya tahan tinggi.
3. Terciptanya metode konstruksi beton bertulang dengan tulangan *FRP* bar yang lebih mudah.

F. Sistematika Penulisan

Agar tulisan ini lebih terarah, maka sistematika penulisan tugas akhir ini diurutkan sebagai berikut:

1. BAB I PENDAHULUAN

Dalam bagian ini diuraikan mengenai hal-hal yang melatarbelakangi penelitian ini dilanjutkan dengan rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian dan ruang lingkup penelitian.

2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bagian ini diuraikan secara sistematis tentang teori, pemikiran dan hasil penelitian terdahulu yang ada hubungannya dengan penelitian ini. Bagian ini memberikan kerangka dasar mengenai konsep, teori yang akan digunakan untuk pemecahan masalah.

3. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bagian ini menjelaskan metodologi penelitian, rancangan dan prosedur penelitian, waktu dan lokasi penelitian, bahan dan alat yang digunakan dalam penelitian metode analisis serta bagan alir penelitian.

4. BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menguraikan hasil uji eksperimental, data yang diperoleh dan dianalisis serta pembahasan hasil penelitian.

5. BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bagian ini memaparkan kesimpulan yang dicapai berdasarkan hasil pembahasan pada bab sebelumnya serta membuat saran-saran yang diperlukan untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJUAN PUSTAKA

A. Beton Bertulang

Sifat utama dari beton, yaitu sangat kuat terhadap beban tekan, tetapi juga bersifat getas/mudah patah atau rusak terhadap beban tarik. Dalam perhitungan struktur, kuat tarik beton ini biasanya diabaikan. Sifat utama dari baja tulangan yaitu sangat kuat terhadap beban tarik maupun beban tekan. Dari sifat utama tersebut, maka jika kedua bahan (beton dan baja tulangan) dipadukan menjadi satu-kesatuan secara komposit, akan diperoleh bahan baru yang disebut beton bertulang (Asroni, 2010). Beton bertulang merupakan kombinasi dua unsur bahan; tulangan baja dan beton yang digunakan secara bersama, sehingga desain struktur elemen beton bertulang dilakukan berdasarkan prinsip yang berbeda dengan perencanaan desain suatu bahan (Nasution, 2009).

Struktur yang dibangun dari beton bertulang, seperti gedung, jembatan, dinding penahan tanah, terowongan, waduk, saluran air dan sejenisnya, dirancang berdasarkan prinsip-prinsip dasar desain. Merancang dan mempelajari komponen struktur beton bertulang yang menerima gaya aksial, momen lentur, gaya geser, momen sesaat atau kombinasi dari gaya-gaya internal ini. Prinsip desain dasar ini umumnya berlaku untuk semua jenis sistem struktur selama variasi gaya aksial, momen lentur, geser dan faktor internal lainnya diketahui, selain konfigurasi bentang dan dimensi, ukuran setiap elemen.

Beton bertulang mempunyai sifat sesuai dengan sifat bahan penyusunnya, yaitu sangat kuat terhadap beban tarik maupun beban tekan, sedangkan beban tekan cukup ditahan oleh beton (Asroni, 2010).

1. Beton memiliki kuat tekan yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan kebanyakan bahan yang lain.
2. Beton bertulang mempunyai ketahanan yang tinggi terhadap api dan air, bahkan merupakan bahan struktur terbaik untuk bangunan yang banyak bersentuhan dengan air.
3. Struktur beton bertulang sangat kokoh.
4. Beton bertulang tidak memerlukan biaya pemeliharaan yang tinggi.
5. Dibandingkan dengan bahan lain beton memiliki usia layan yang sangat panjang. Dalam kondisi-kondisi normal, struktur beton bertulang dapat digunakan sampai kapan pun tanpa kehilangan kemampuannya untuk menahan beban.
6. Beton biasanya merupakan satu-satunya bahan yang ekonomis untuk fondasi tapak, dinding, *basement*, tiang tumpuan jembatan, dan bangunan-bangunan semacam itu.
7. Salah satu ciri khas beton adalah kemampuannya untuk dicetak menjadi bentuk sangat beragam, mulai dari pelat, balok, dan kolom yang sederhana sampai atap kubah dan cangkang besar.
8. Di sebagian besar daerah, beton terbuat dari bahan-bahan lokal yang murah (pasir, kerikil, dan air) dan relatif hanya membutuhkan sedikit semen dan tulangan baja, yang mungkin saja harus didatangkan dari daerah lain.

9. Keahlian buruh untuk membangun konstruksi beton bertulang lebih rendah bila dibandingkan dengan bahan lain seperti baja struktur.

Disamping kelebihan-kelebihan beton bertulang sebagai suatu bahan struktur, beton bertulang juga mempunyai berbagai kekurangan dan kelemahan. Kelemahan-kelemahan tersebut antara lain adalah (McCormac, 2004):

1. Beton mempunyai kuat tarik yang sangat rendah, sehingga memerlukan penggunaan tulangan tarik.
2. Beton bertulang memerlukan bekisting untuk menahan beton tetap di tempatnya sampai beton tersebut mengeras. Selain itu, penopang atau penyangga sementara mungkin diperlukan untuk menjaga agar bekisting tetap berada pada tempatnya, misalnya pada kolom, dinding, atap, dan struktur-struktur sejenis, sampai bagian-bagian beton ini cukup kuat untuk menahan beratnya sendiri.
3. Rendahnya kekuatan per satuan berat dari beton mengakibatkan beton bertulang menjadi berat.
4. Rendahnya kekuatan persatuan volume akan mengakibatkan beton akan berukuran relatif lebih besar.
5. Sifat-sifat beton sangat bervariasi karena bervariasinya proporsi-campuran dan pengadukannya.

Perilaku struktur yang terdiri dari beton bertulang tidak hanya tergantung pada sifat materialnya tetapi juga pada karakteristik bebannya. Ada situasi di mana struktur menerima beban statis, yaitu beban yang besarnya konstan atau berubah-ubah secara perlahan dan beroperasi dalam waktu yang lama. Ada juga beban

dinamis, misalnya beban impuls yang beroperasi secara tiba-tiba dan beban berulang yang terjadi selama sejumlah besar siklus.

Kegagalan pada balok beton bertulang pada dasarnya dipengaruhi oleh melelehnya tulangan baja dan hancurnya beton bertulang. Ada 3 kemungkinan yang biasa terjadi penyebab kegagalan balok beton bertulang:

1. Kondisi *Balanced Reinforced*

Tulangan tarik mulai leleh tepat pada saat beton mencapai regangan batasnya dan akan hancur karena tekan.

Kondisi regangan:

$$\varepsilon_c = 0.003 \quad \text{dan} \quad \varepsilon_s = \frac{fy}{E_s} \quad (2.1)$$

Pada kondisi ini berlaku:

$$\rho = \rho_{\text{balance}} \quad \text{dan} \quad \varepsilon_s = \varepsilon_c \quad (2.2)$$

2. Kondisi *Over-Reinforced*

Kondisi ini terjadi apabila tulangan yang digunakan lebih banyak dari yang diperlukan dalam keadaan *balanced*. Keruntuhan ditandai dengan hancurnya penampang beton terlebih dahulu sebelum tulangan baja meleleh.

Pada kondisi ini berlaku:

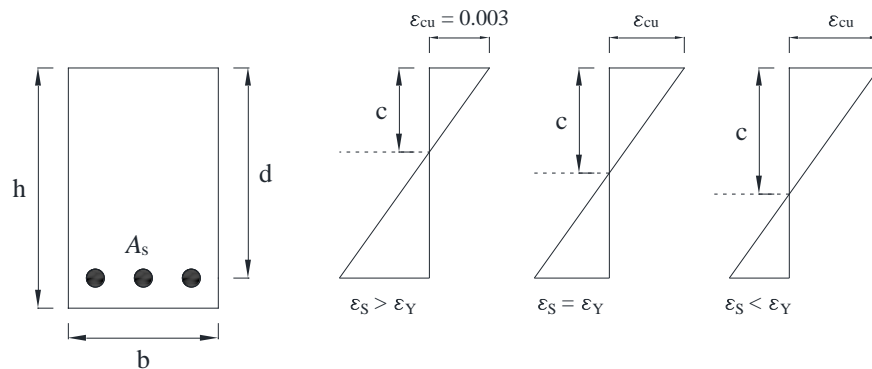
$$\rho = \rho_{\text{balance}} \quad \text{dan} \quad \varepsilon_s < \varepsilon_c \quad (2.3)$$

3. Kondisi *Under-Reinforced*

Kondisi ini terjadi apabila tulangan tarik yang dipakai pada balok kurang dari yang diperlukan untuk kondisi *balance*. Keruntuhan ditandai dengan

lelehnya tulangan baja terlebih dahulu dari betonnya. Pada kondisi ini berlaku:

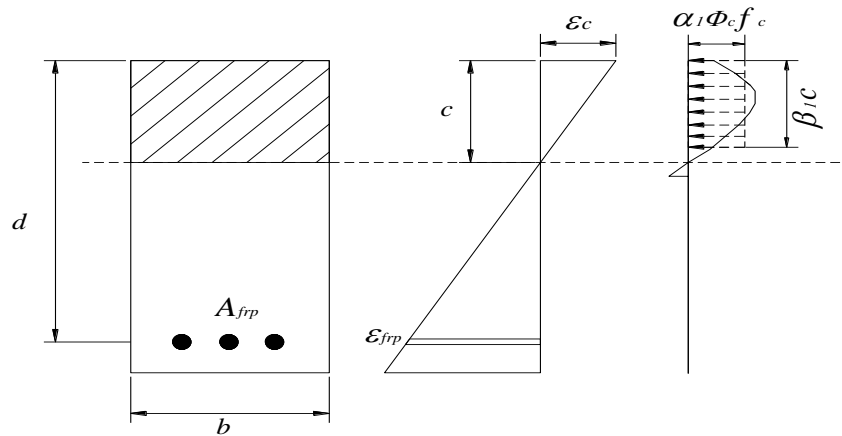
$$\rho < 75^\circ \rho_{balance} \quad \text{dan} \quad \varepsilon_s > \varepsilon_c \quad (2.4)$$



Gambar 5. Diagram keruntuhan balok

B. Karakteristik Lentur Balok Beton Bertulang *FRP Bar*

Sebagian besar pedoman desain elemen struktur lentur yang menggunakan tulangan *FRP bar* yang diungkapkan oleh Bywalski (Bywalski, Drzazga, Kamiński, & Kaźmierowski, 2016) mengizinkan terjadinya dua mode kegagalan struktur yaitu kegagalan getas dengan hancurnya beton pada sisi tertekan dan kegagalan tarik dengan putusya tulangan *FRP*. Mode kegagalan beton pada sisi tertekan lebih disukai dibandingkan dengan mode kegagalan Tarik, karena sifat plastis beton yang dapat melebihi kondisi batas bisa menjadi pertanda kegagalan dan kegagalannya lebih lambat dibandingkan dengan kegagalan akibat putusya tulangan *FRP bar*.



Gambar 6. Distribusi regangan dan tegangan pada batang lentur yang menggunakan tulangan *FRP*

Kegagalan regangan seimbang diartikan sebagai regangan dalam beton (ϵ_c) dan regangan dalam tulangan *FRP* (ϵ_{frp}) secara bersamaan mencapai nilai ultimit ($\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ dan $\epsilon_{frp} = \epsilon_{frpu}$) seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 6**. Kondisi regangan ultimit pada beton bertulangan *FRP* sangat berbeda dengan beton bertulang konvensional yang menggunakan tulangan baja, di mana pada beton bertulangan *FRP* tidak dijumpai adanya perilaku daktail pada kondisi tersebut dan keruntuhan terjadi secara tiba-tiba tanpa ada peringatan.

Asumsi dasar yang digunakan dalam menentukan dimensi elemen struktur lentur:

- regangan tekan maksimum dalam beton berkisar antara $\epsilon_{cu} = 3\%$ dan $\epsilon_{cu} = 3.5\%$
- regangan dianggap linear (sesuai hipotesa Euler-Bernoulli)
- beton pada sisi tarik diabaikan

- hubungan tegangan dan regangan yang linear elastik terjadi pada tulangan *FRP* sampai runtuh
- terjadi ikatan yang sempurna antara beton dan tulangan *FRP*.

1. Sifat mekanik material tulangan *FRP*

Sifat material dari pabrik seperti kuat tarik tergaransi belum termasuk di dalamnya faktor pengaruh lingkungan jangka panjang. Pengaruh lingkungan jangka panjang dapat mengurangi kuat tarik dan daya tahan terhadap keruntuhan rangkai dan fatik tulangan *FRP*. Kekuatan tarik tulangan *FRP* harus ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (2.5)$$

Di mana:

$$f_{fu} = \text{Kuat tarik desain } FRP \quad (\text{MPa})$$

$$C_E = \text{Faktor reduksi lingkungan}$$

$$f_{fu}^* = \text{Kuat tarik garansi } FRP \text{ dari pabrik} \quad (\text{MPa})$$

Regangan runtuh desain ditentukan sebagai berikut:

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (2.6)$$

Di mana:

$$\varepsilon_{fu} = \text{Regangan runtuh desain tulangan } FRP$$

$$C_E = \text{Faktor reduksi lingkungan}$$

$$\varepsilon_{fu}^* = \text{Regangan runtuh garansi tulangan } FRP \text{ dari pabrik}$$

Kuat tarik batang *FRP* pada bengkokan ditentukan berdasarkan persamaan:

$$f_{fbt} = \left(0.005 \frac{r_b}{d_b} + 0.3\right) f_{fu} \leq f_{fu} \quad (2.7)$$

Di mana:

f_{fbt} = Kuat tarik desain bengkokan tulangan *FRP* (MPa)

r_b = Jari – jari lengkung bengkokan (MPa)

d_b = Diameter tulangan *FRP* (mm)

f_{fu} = Kuat tarik desain *FRP*, yang telah direduksi
kekuatannya akibat pengaruh lingkungan (MPa)

2. Mode Keruntuhan

Mode keruntuhan menentukan kapasitas lentur batang terlentur yang menggunakan tulangan *FRP*. Mode keruntuhan ini ditentukan berdasarkan perbandingan rasio tulangan *FRP* dengan rasio tulangan *FRP* seimbang yang dihitung menggunakan kekuatan tarik desain. Rasio tulangan *FRP* seimbang dapat dihitung menurut persamaan 4 sebagai berikut:

$$\rho_{fb} = 0.85 \frac{f'_c}{f_{fu}} \beta_1 \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (2.8)$$

Di mana:

ρ_{fb} = Rasio tulangan seimbang dari tulangan *FRP*

f'_c = Kuat tekan beton (MPa)

f_{fu} = Kuat tarik ultimit desain tulangan *FRP* (MPa)

β_1 = Faktor reduksi kuat tekan beton

E_f = Modulus elastisitas beton (MPa)

ε_{cu} = regangan tekan maksimum dalam beton

Jika rasio tulangan *FRP* ($\rho_f = \frac{A_f}{bd}$) lebih kecil dari rasio tulangan seimbang (p_{fb}) maka akan terjadi mode keruntuhan akibat kegagalan *FRP* dan sebaliknya jika $p_f > p_{fb}$, maka akan terjadi mode keruntuhan akibat kegagalan atau keretakan beton

3. Momen retak awal

Sebagaimana halnya dengan balok beton bertulang biasa yang menggunakan tulangan baja, balok dengan tulangan *GFRP Bar* juga mengalami retak pada saat nilai modulus keruntuhan (f_r) dicapai. Besarnya modulus keruntuhan dihitung dengan persamaan:

$$f_r = 0.62\sqrt{f'_c} \quad 2.9$$

Di mana:

$$f_r = \text{Modulus keruntuhan beton} \quad (\text{MPa})$$

$$f'_c = \text{Kuat tekan beton} \quad (\text{MPa})$$

Momen retak awal selanjutnya dihitung menggunakan persamaan:

$$M_{cr} = \frac{2f_r I_g}{h} \quad (2.10)$$

Di mana:

$$M_{cr} = \text{Momen retak} \quad (\text{Nm})$$

$$f_r = \text{Modulus keruntuhan beton} \quad (\text{MPa})$$

$$I_g = \text{Inersia penampang bruto} \quad (\text{mm})$$

$$h = \text{Tinggi penampang} \quad (\text{mm})$$

4. Momen nominal

Ketika rasio tulangan $\rho_f > \rho_{fb}$, momen nominal penampang beton bertulangan *FRP* dihitung berdasarkan kesetimbangan gaya dan regangan dalam penampang. Distribusi tegangan diperkirakan dengan mengasumsikan sebagai blok tegangan segi empat untuk nilai rasio tulangan lebih besar dari rasio tulangan seimbang. Momen nominal penampang dihitung dengan persamaan berikut:

$$M_n = A_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2 \quad (2.11)$$

Di mana:

$$M_n = \text{Momen nominal penampang} \quad (\text{Nmm})$$

$$A_f = \text{Luas tulangan } FRP \quad (\text{mm}^2)$$

$$f_f = \text{Tegangan dalam tulangan } FRP \quad (\text{MPa})$$

$$\rho_f = \text{Rasio tulangan terpasang balok beton bertulang } FRP$$

$$f'_c = \text{Kuat tekan beton} \quad (\text{MPa})$$

$$b = \text{Lebar penampang} \quad (\text{mm})$$

$$d = \text{tinggi efektif penampang} \quad (\text{mm})$$

Tegangan dalam tulangan *FRP* dihitung dengan persamaan:

$$f_f = \left[\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu} \right] \leq f_{fu} \quad (2.12)$$

Di mana:

$$f_f = \text{Tegangan dalam tulangan } FRP \quad (\text{MPa})$$

E_f = Modulus elastisitas beton (MPa)

ε_{cu} = regangan tekan maksimum dalam beton

β_1 = Faktor reduksi kuat tekan beton

f'_c = Kuat tekan beton (MPa)

ρ_f = Rasio tulangan terpasang balok beton bertulang

FRP

f_{fu} = Kuat tarik ultimit desain tulangan *FRP* (MPa)

Tegangan dalam tulangan *FRP* bersifat linear elastik, harus lebih kecil dari tegangan tarik desain. Nilai $A_f f_f$ memegang peranan penting pada balok beton bertulang dengan tulangan *FRP* karena menentukan besarnya kapasitas lentur, lendutan dan lebar retak (El-Nemr, Ahmed, El-Safty & Benmokrane, 2018).

Hal berbeda jika $\rho_f < \rho_{fb}$, blok tegangan segi empat ekuivalen tidak dapat diterapkan karena nilai regangan maksimum beton ($\varepsilon_c = 0.003$) tidak dapat dicapai. Analisis penampang beton tertekan menggabungkan dua variabel yang tidak diketahui yaitu regangan tekan beton dan tinggi penampang tertekan terhadap sumbu netral pada saat runtuh. Faktor α_1 dan β_1 pada blok tegangan segi empat ekuivalen tidak diketahui di mana α_1 adalah rasio tegangan rata-rata beton dan β_1 adalah rasio tinggi blok tegangan segi empat ekuivalen terhadap sumbu netral. Momen lentur nominal penampang untuk $\rho_f < \rho_{fb}$ dihitung dengan persamaan berikut:

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (2.13)$$

Di mana:

M_n	=	Momen nominal penampang	(MPa)
A_f	=	Luas tulangan <i>FRP</i>	(mm ²)
f_{fu}	=	Kuat tarik ultimit desain tulangan <i>FRP</i>	(MPa)
d	=	tinggi efektif penampang	(mm)
β_1	=	Faktor reduksi kuat tekan beton	
c	=	Kedalaman penampang tak retak terhadap sumbu netral	(mm)

5. Daya layan

Salah satu kelemahan beton bertulang yang menggunakan tulangan *FRP* yakni rendahnya kekakuan setelah mengalami retak. Rancangan elemen lentur yang menggunakan tulangan *FRP* harus memenuhi kriteria layanan yang memuaskan dalam hal lendutan dan lebar retak. Daya layan dapat didefinisikan sebagai kinerja yang memuaskan pada kondisi beban layan yang terlihat dalam dua parameter:

a. Retakan

Dengan alasan estetika maka lebar retak yang berlebihan tidak diperkenankan dan lainnya (misalnya untuk kebocoran) yang dapat merusak atau memperburuk beton struktural. Lebar retakan maksimum untuk beton bertulangan *FRP* dapat dihitung berdasarkan formula yang diterima dalam (ACI Committee 318, 2008). Formula ini dapat

digunakan untuk tulangan baja atau *FRP* tergantung pada koefisien kualitas lekatan (k_b).

$$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (2.14)$$

Di mana:

w = lebar retak maksimum (mm)

f_f = Tegangan dalam tulangan *FRP* (MPa)

E_f = Modulus elastisitas beton (MPa)

β = Rasio jarak garis netral ke muka sisi tarik dengan garis netral ke as tulangan tarik

k_b = koefisien derajat kelekatan tulangan dengan beton, (ACI 440.1R-06 2003) mengasumsikan 1.4

d_c = Tebal selimut yang dihitung dari sisi tarik ke as tulangan terdekat (mm)

s = Jarak spasi tulangan memanjang (mm)

b. Lendutan

Lendutan harus berada dalam batas yang dapat diterima akibat penggunaan struktur (misalnya untuk mendukung elemen non struktural tanpa kerusakan). ACI 318-08 mengadopsi formula modifikasi dari persamaan Branson untuk menghitung momen inersia efektif:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g \quad (2.15)$$

Di mana:

I_e	=	Inersia penampang efektif	(mm)
M_{cr}	=	Momen retak	(Nm)
M_a	=	Momen maksimum pada level lendutan yang dihitung	(Nmm)
β_d	=	Koefisien reduksi dalam perhitungan lendutan	
I_g	=	Inersia penampang bruto	(mm ⁴)
I_{cr}	=	Inersia penampang rerak	(mm ⁴)

Nilai β_d didapatkan dari rasio tulangan *FRP* terhadap rasio tulangan seimbangnya.

$$\beta_d = \frac{1}{5} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right) \leq 1 \quad (2.16)$$

Di mana:

β_d	=	Koefisien reduksi dalam perhitungan lendutan
ρ_f	=	Rasio tulangan <i>FRP</i>
ρ_{fb}	=	Rasio tulangan seimbang dari tulangan <i>FRP</i>

Lendutan elemen beton bertulang akibat dua buah beban terpusat yang bekerja dapat dihitung dengan persamaan 2.15 sebagai berikut:

$$\Delta = \frac{PL}{24E_c I_e} (3L^2 - 4a^2) \quad (2.17)$$

Di mana:

Δ	=	Lendutan	(mm)
P	=	Beban terpusat	(N)
L	=	Panjang bentang	(mm)
E_c	=	Modulus elastisitas beton	(MPa)

I_e = Inersia penampang efektif (mm⁴)

a = Jarak bentang geser (mm)

6. Rekatan tulangan-beton

Beton bertulang merupakan bahan komposit di mana lekatan antara tulangan dengan beton merupakan aspek penting yang harus diperhatikan karena kekuatan lekatan ini menahan gaya-gaya yang dapat menyebabkan lepasnya tulangan dari beton. Menurut Nawi (Nawi,1998) kuat lekat antara baja tulangan dan beton yang membungkusnya dipengaruhi oleh faktor antara lain:

a. Adhesi

merupakan ikatan kimiawi yang terbentuk pada seluruh bidang kontak antara beton dan tulangan akibat adanya proses reaksi pengerasan semen.

b. Friksi

merupakan tahanan geser terhadap gelinciran dan saling mengunci pada saat elemen penguat atau tulangan mengalami tegangan tarik. Mekanisme ini terbentuk karena adanya permukaan yang tidak beraturan pada bidang kontak antara beton dan tulangan.

c. *Interlocking*

mekanisme ini terbentuk karena adanya interaksi antara ulir atau tonjolan tulangan (*rib*) dengan matriks beton yang ada di sekitarnya,

mekanisme ini sangat bergantung pada kekuatan, dan kepadatan material beton, geometri dan diameter tulangan.

d. *Gripping*

efek memegang (*gripping*), akibat susut/pengeringan beton di sekeliling tulangan.

e. Efek kualitas beton

kualitas beton meliputi kuat tarik dan kuat tekan. Akibat desakan oleh tegangan radial, beton mengalami tegangan tarik keliling, jika tegangan tarik ijin beton terlampaui maka akan mengakibatkan retak belah.

f. Efek mekanisme penjangkaran ujung tulangan

efek penjangkaran dapat berupa panjang lewatan/tanam, bengkakan tulangan dan persilangan tulangan.

g. Diameter

bentuk dan jarak tulangan(kesemuanya) mempunyai pengaruh terhadap pertumbuhan retak radial. Diameter ulangan kecil memiliki ketahanan slip yang lebih baik dibandingkan dengan tulangan diameter besar. Sama halnya dengan tulangan berulir lebih unggul menahan slip dibandingkan dengan tulangan polos.

h. Selimut beton

selimut beton yang tidak mencukupi untuk mengakomodasi tegangan tarik keliling akan mengakibatkan retak belah yang selanjutnya mengakibatkan kehancuran belah.

7. Rekatan tulangan FRP – beton

Salah satu keuntungan penggunaan tulangan *FRP* adalah rekatannya yang cukup baik dengan beton. Tulangan *FRP* dari material serat gelas memiliki lekatan yang cukup baik, setara dengan lekatan tulangan besi pada beton berdasarkan uji *pull – out* (Rolland et al,2018). Penelitian yang serupa juga menunjukkan bahwa tulangan *FRP* dari material gelas dan karbon juga memiliki lekatan yang sama baiknya dengan tulangan besi (Baena, Torres, Turon, & Barris, 2009). Maranan (Maranan, Manalo, Karunasena, & Benmokrane, 2015) juga meneliti kekuatan lekatan tulangan *GFRP Bar* dalam beton geopolimer di mana hasilnya menunjukkan lekatan yang cukup baik.

8. Pengaruh selimut beton

Fungsi utama selimut beton pada struktur beton bertulang adalah untuk melindungi tulangan baja dari korosi dan suhu yang tinggi akibat kebakaran. Ketebalan selimut beton pada struktur beton bertulang tergantung pada lingkungan di sekitarnya. Semakin agresif lingkungan, maka semakin tebal selimut beton yang harus diberikan untuk melindungi tulangan.

Ketebalan minimum selimut beton untuk tulangan baja dengan diameter lebih kecil atau sama dengan 16 mm sebesar 15 mm dan untuk tulangan dengan diameter lebih besar atau sama dengan 19 mm sebesar 20 mm (SNI 2847 2002). Peningkatan tebal selimut beton dapat meningkatkan

kapasitas rekatan struktur baja dengan beton (X. Wang et al. 2019). Bertambahnya tebal selimut beton meningkatkan kapasitas slip tulangan GFRP bar ke beton (Veljkovic et al. 2017).

Berkurangnya tebal selimut beton menyebabkan berkurangnya rekatan tulangan dengan beton di sekelilingnya. Berkurangnya rekatan tulangan dengan beton menurunkan kapasitas lentur, kekakuan dan daktilitas balok beton bertulang (Mousa 2016).

C. Kuat Geser Balok Beton Menggunakan tulangan geser eksternal

Kekuatan geser nominal penampang beton bertulang adalah jumlah tahanan geser yang diberikan oleh beton dan tulangan geser.

1. Kontribusi geser beton yang ditulangi dengan tulangan *FRP*

Penampang melintang dengan penulangan lentur menggunakan tulangan *FRP* setelah retak memiliki kedalaman retak yang lebih kecil ke sumbu netral karena kekakuan aksial yang lebih rendah dibandingkan dengan beton bertulang baja dengan luas tulangan memanjang yang sama. Daerah tertekan penampang berkurang, dan lebar retak lebih lebar. Akibatnya, ketahanan geser yang disediakan oleh ikatan antar agregat dan beton tertekan lebih kecil. Penelitian tentang kapasitas geser batang lentur tanpa tulangan geser menunjukkan bahwa kekuatan geser beton dipengaruhi oleh kekakuan tulangan lentur. Kontribusi tulangan memanjang *FRP* dengan istilah aksi dowel belum dapat ditentukan. Karena kekuatan dan kekakuan yang lebih rendah pada batang *FRP* dalam arah melintang, diasumsikan

bahwa kontribusi aksi dowelnya lebih kecil dari pada tulangan baja dengan luas yang sama. Kekuatan geser penampang beton bertulang yang menggunakan tulangan *FRP* dapat dievaluasi menggunakan persamaan berikut:

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c b_w c} \quad (2.18)$$

Di mana:

b_w = Lebar badan balok (mm)

f'_c = Kuat tekan beton (MPa)

V_c = Kontribusi beton menahan geser (N)

c = Kedalaman penampang tak retak terhadap sumbu netral yang ditentukan dengan persamaan 2.19

$$c = kd \rightarrow k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (2.19)$$

Di mana:

k = Rasio kedalaman sumbu netral terhadap kedalaman tulangan

ρ_f = Rasio tulangan *FRP*

n_f = Rasio modulus antara tulangan *FRP* dan beton

2. Kontribusi geser lembaran *FRP*

Kontribusi sistem perkuatan dengan lembaran *FRP* terhadap kekuatan geser didasarkan pada orientasi serat dan asumsi pola retak. Kekuatan geser yang diberikan oleh penulangan dengan lembaran *FRP* dapat ditentukan dengan

menghitung gaya yang dihasilkan dari tegangan tarik pada lembaran FRP di seluruh retakan. Sumbangan geser penulangan geser lembaran FRP seperti persamaan berikut:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha)}{s_f} \quad (2.20)$$

Di mana:

$$V_f = \text{Kuat geser dari } FRP \text{ Sheet} \quad (\text{N})$$

$$s_f = \text{Jarak } FRP \text{ Sheet} \quad (\text{mm})$$

$$A_{fv} = \text{Luas tulangan geser dari } FRP \text{ Sheet} \quad (\text{mm}^2)$$

$$f_{fe} = \text{Tegangan dalam } FRP \text{ Sheet} \quad (\text{MPa})$$

Dimana untuk nilai A_{fv} bisa didapatkan dengan persamaan 2.21, sedangkan untuk nilai f_f diperoleh melalui persamaan 2.22

$$A_{fv} = 2nt_f w_f \quad (2.21)$$

$$f_f = \varepsilon_{fe} E_f \quad (2.22)$$

Di mana:

$$n = \text{Jumlah lapis } FRP \text{ Sheet}$$

$$t_f = \text{Tebal } FRP \text{ Sheet} \quad (\text{mm})$$

$$w_f = \text{Lebar } FRP \text{ Sheet} \quad (\text{mm})$$

$$\varepsilon_{fe} = \text{Regangan efektif } FRP \text{ Sheet}$$

$$E_f = \text{Modulus elastisitas tulangan } FRP \quad (\text{MPa})$$

Sistem FRP yang tidak menutup keseluruhan bagian penampang (membungkus dua dan tiga sisi) atau lapisan *U-Wraps* telah diamati proses delaminasinya dari beton sebelum hilangnya ikatan antar agregat

penampang. Tegangan lekatan dianalisis untuk menentukan kegunaan sistem ini dan tingkat regangan efektif yang dapat dicapai. Untuk menghitung kekuatan geser maka regangan efektif yang dihitung harus menggunakan koefisien reduksi ikatan K_v sebagai berikut:

$$\varepsilon_{fe} = K_v \varepsilon_{fu} \leq 0.04 \quad (2.23)$$

Di mana:

ε_{fe} = Regangan efektif *FRP Sheet*

K_v = Koefisien reduksi ikatan laminasi *FRP Sheet*

ε_{fu} = Regangan ultimit *FRP Sheet*

Untuk nilai K_v dapat diperoleh dengan persamaan 2.24

$$K_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (2.24)$$

Di mana:

k_1 = Faktor modifikasi kekuatan beton yang dipakai untuk menghitung K_v

k_2 = Faktor modifikasi skema laminasi untuk menghitung K_v

L_e = Panjang lekatan aktif laminasi *FRP Sheet* (mm)

ε_{fu} = Regangan ultimit *FRP Sheet*

L_e adalah Panjang ikatan aktif dimana Sebagian besar tegangan ikatan dipertahankan dan di rumuskan dalam persamaan 2.25

$$L_e = \frac{23300}{(n_f t_f E_f)^{0.58}} \quad (2.25)$$

Di mana:

$$\begin{aligned}
 n_f &= \text{Rasio modulus elastisitas } FRP \text{ dengan beton} \\
 t_f &= \text{Tebal } FRP \text{ Sheet} \quad (\text{mm}) \\
 E_f &= \text{Modulus elastisitas tulangan } FRP \quad (\text{MPa})
 \end{aligned}$$

Koefisien reduksi lekatan bergantung pada dua faktor modifikasi, k_1 dan k_2 , yang memperhitungkan kekuatan beton dan jenis skema pembungkus yang digunakan

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.26)$$

$$k_2 = \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} \quad (2.27)$$

Di mana

$$\begin{aligned}
 f'_c &= \text{Kuat tekan beton} \quad (\text{MPa}) \\
 d_{fv} &= \text{Tinggi efektif tulangan geser } FRP \text{ Sheet} \quad (\text{mm}) \\
 L_e &= \text{Panjang lekatan aktif laminasi } FRP \text{ Sheet} \quad (\text{mm})
 \end{aligned}$$

D. Penelitian Terdahulu

1. Kusnadi (Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang *GFRP Bar* Tanpa Selimut Yang Menggunakan *GFRP Sheet* Sebagai Tulangan Geser)

Struktur beton bertulang rawan terhadap kerusakan akibat korosi pada baja tulangan. Untuk meningkatkan keawetan dan kapasitas lentur balok, maka tulangan baja digantikan dengan *GFRP Bar* sebagai tulangan tarik dan sengkang baja digantikan dengan *GFRP Sheet* sebagai tulangan geser dimana selimut beton dihilangkan untuk menambah tinggi efektif penampang.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kapasitas lentur, kekakuan dan daktilitas balok beton bertulang *GFRP Bar* tanpa selimut beton yang menggunakan *GFRP Sheet* sebagai tulangan geser (BFTS) dibandingkan dengan balok beton bertulangan baja (BK) dan balok bertulang *GFRP Bar* (BFS) konvensional. Pengujian dilakukan dengan empat titik pembebanan lentur. Pembebanan diberikan secara statis monotonik dengan kecepatan 0.03 mm/detik sampai benda uji gagal.

Kapasitas beban lentur balok BFTS lebih besar 52.9% dibandingkan dengan balok BK dan lebih besar 13.4 % dibandingkan dengan balok BFS. Meskipun penggunaan tulangan *GFRP Bar* mengurangi kekakuan balok, namun kekakuan balok beton *GFRP Bar* tanpa selimut beton yang menggunakan *GFRP Sheet* sebagai tulangan geser lebih besar 10.6% dibandingkan dengan kekakuan balok beton *GFRP Bar* konvensional. Daktilitas balok beton bertulang *GFRP Bar* tanpa selimut yang menggunakan *GFRP Sheet* sebagai tulangan geser lebih kecil dibandingkan dengan balok beton bertulang konvensional sebagai akibat rendahnya kapasitas geser penampang.

2. Saddam Husein (Analisa Pola Kegagalan Balok Beton Menggunakan *GFRP Bar* Tanpa Selimut Beton)

Struktur beton bertulang yang menggunakan tulangan baja pada daerah korosif, menjadi rawan terhadap kerusakan atau penurunan kekuatannya akibat korosi. Korosi pada tulangan baja merupakan salah satu