

**STUDI PENGARUH BEBAN FATIK TERHADAP KAPASITAS  
LENTUR BALOK BETON BERTULANG DENGAN  
PERKUATAN GLASS FIBER REINFORCED POLYMER  
SHEET**

*STUDY ON THE EFFECT OF FATIGUE LOADING TO FLEXURAL  
CAPACITY OF CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH GLASS  
FIBER REINFORCED POLYMER SHEET*

**FATRIADY MR**



**PROGRAM PASCASARJANA  
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2013**

**STUDI PENGARUH BEBAN FATIK TERHADAP KAPASITAS  
LENTUR BALOK BETON BERTULANG DENGAN  
PERKUATAN GLASS FIBER REINFORCED POLYMER  
SHEET**

**Tesis**

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Magister Teknik

Program Studi  
Teknik Sipil

Disusun dan Diajukan Oleh

**FATRIADY MR**

**kepada**

**PROGRAM PASCA SARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2013**

# TESIS

## STUDI PENGARUH BEBAN FATIK TERHADAP KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANG DENGAN PERKUATAN GLASS FIBER REINFORCED POLYMER SHEET

Disusun dan diajukan oleh

**FATRIADY MR**

**Nomor Pokok P2303211010**

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Tesis  
pada tanggal 19 Nopember 2013  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui

Komisi Penasihat,

**Prof. Dr.-Ing. Herman Parung, M. Eng.**

Ketua

Ketua Program Studi  
Teknik Sipil,

**Dr. Rudy Djamaluddin, ST., M. Eng.**

Anggota

Program Pascasarjana  
Universitas Hasanuddin,

**Dr. Rudy Djamaluddin, ST., M.Eng.**

**Prof. Dr. Ir. Mursalim.**

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Fatriady MR  
Nomor Mahasiswa : P2303211010  
Program Studi : Teknik Sipil  
Konsentrasi : Struktur

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, November 2013

Yang menyatakan,

**Fatriady MR**

## PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu Wata'ala dengan selesainya tesis ini.

Tesis yang di dalamnya mempelajari pengaruh pembebanan fatik terhadap kapasitas lentur balok beton bertulang sebagai bagian utama dalam dunia konstruksi sekarang ini. Diharapkan penelitian ini menjadi dasar munculnya penelitian-penelitian lain yang lebih mengeksplor mengenai kapasitas struktur beton bertulang dalam menerima beban yang bergoyang.

Banyak kendala yang di hadapi oleh penulis dalam rangka penyusunan tesis ini, berkat bantuan berbagai pihak maka tesis ini dapat selesai. Dalam kesempatan ini penulis dengan tulus menyampaikan terima kasih yang tak terhingga kepada Bapak Prof. Dr.-Ing. Herman Parung, M. Eng. sebagai Ketua Komisi Penasihat dan Bapak Dr. Rudy Djamaluddin, ST., M. Eng. sebagai Anggota Komisi Penasihat atas bantuan dan bimbingan yang telah diberikan mulai dari pengembangan minat terhadap permasalahan penelitian ini, pelaksanaan penelitian sampai dengan penulisan tesis ini. Rekan-rekan mahasiswa Pascasarjana Program Studi Teknik Sipil Konsentrasi Struktur angkatan 2011. Ucapan terimakasih secara khusus penulis sampaikan kepada orang tua tercinta Alm. Ir. Mustaking dan Hj. Rusniah, S.Pd, spesial buat keluarga kecilku Nur Rahma, S.KM bersama anakda tercinta Rabih Said Faraharitsa dan

saudara-saudara/teman/sahabat atas doa dan dorongan moril yang telah diberikan.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari kesempurnaan,oleh karena itu sangat diharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan tesis ini. Semoga tesis ini dapat bermanfaat dan digunakan untuk pengembangan ilmu pengetahuan bagi kita semua termasuk penelitian lebih lanjut.

Makassar, November 2013

Fatriady MR

## ABSTRAK

FATRIADY MR. *Studi Pengaruh Beban Fatik Terhadap Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang Dengan Perkuatan Glass Fiber Reinforced Polymer Sheet* (dibimbing oleh Herman Parung dan Rudy Djamaluddin).

Masa guna elemen struktur beton bertulang bisa diartikan bahwa elemen struktur beton bertulang sudah tidak mampu menahan beban berulang. Dalam kaitan ini, diadakan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui perilaku lentur dan efek perkuatan Glass Fiber Reinforced Polymer Sheet (GFRP-S) pada pembebanan fatik. Metode-metode yang mengatur batasan-batasan atau kontrol dalam perhitungan mengenai kapasitas balok uji serta dampaknya terhadap perilaku dan perkuatan pada balok uji diperoleh pada sejumlah referensi.

Penelitian ini membuat balok uji dengan model skala penuh dengan ukuran 300 x 500 x 6000 mm. Jumlah balok uji yang disediakan masing-masing 4 buah beton bertulang. Pengujian dilakukan pada teknik pembebanan statik pada 3 buah balok uji A 1, B 1, dan B 2 dan pembebanan fatik pada 1 buah benda uji B 2 dengan frekuensi siklus 1.25 Hz. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaruh kelelahan pada beton dalam menerima beban cukup berpengaruh besar pada kapasitas dan perilaku beton. Beton yang menerima beban statik mampu menerima beban maksimum 470 kN sedangkan beton yang menerima beban fatik mampu menerima beban fatik minimum 75 kN dan maksimum 260 kN bertahan sampai pada 1.300.000 siklus.

Hasil pengamatan pada konstruksi balok uji pembebanan statik dan fatik menunjukkan perkuatan GFRP-S mampu meningkatkan kapasitas balok uji dalam menerima beban. Sementara pada balok uji pembebanan fatik diperoleh hasil kerusakan yang terparah menunjukkan perlunya penelitian lebih lanjut mengenai teknik perkuatan struktur dalam mengatasi sifat lelah pada konstruksi. Hasil analisis teori perkuatan, menunjukkan bahwa hasil akhir pekerjaan konstruksi akan berdampak pada sistem perkuatan konstruksi itu sendiri.

kata kunci : beban statik, beban fatik, cycle, perkuatan, kapasitas.

## ABSTRACT

FATRIADY MR. *Study On The Effect Fatigue Load To Flexure Capacity Of Concrete Beams Reinforced With Glass Fiber Reinforced Polymer Sheet* (supervised by Herman Parung and Rudy Djamaluddin)

*The useful life of reinforced concrete structural elements can be interpreted that the reinforced concrete structural elements are not able to withstand repeated loads. In this regard, the research aimed to determine the flexural behavior and reinforcement effects Glass Fiber Reinforced Polymer-Sheet (GFRP-S) on the fatigue loading. Methods to set boundaries or control in the calculation of the capacity of the test beam as well as their impact on behavior and reinforcement in the beam test obtained in a number of references.*

*This study makes the beam test with full-scale models with size 300 x 500 x 6000 mm. Number of test beam provided each of the 4 pieces of reinforced concrete. Tests conducted on the technique of static load test on 3 pieces of blocks A 1, B 1, B 2 and the loading and fatigue in 1 piece specimen B 2 with a frequency of 1:25 Hz cycle. The results showed that the effect of fatigue on the concrete receiving sufficient load capacity and a huge influence on the behavior of concrete. Concrete receiving static load is able to accept a maximum of 470 kN load while receiving concrete fatigue loads capable of accepting a minimum fatigue load 75 kN and 260 kN maximum endure to 1,300,000 cycles.*

*Observations on the construction beam static and fatigue loading test showed GFRP-S reinforcement is able to increase the capacity of the receiving load test beam. While the beam fatigue loading test results obtained showed severe damage to the need for further research on structural retrofitting techniques to overcome fatigue properties of the construction. Reinforcement theory analysis results, showing that the final results of the construction work will have an impact on strengthening the system construction itself.*

*keywords: static load, fatigue load, cycle, reinforcement, capacity*



**DAFTAR ISI**

	<b>halaman</b>
PRAKATA	v
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian	3
D. Manfaat Penelitian	4
E. Ruang Lingkup	4
F. Sistematika dan Organisasi	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
A. Hasil Penelitian Sebelumnya	6
B. Kerangka Pikir	8
C. Beton Bertulang	9
1. Teori analisa penampang beton bertulang	9
2. Teori underreinforced, overreinforced dan balance steel ratio	15

3. Geser dan lentur dalam beton bertulang	16
4. Rumus gaya geser dalam balok beton bertulang	17
5. Pola retak dalam balok beton bertulang	18
D. Balok Beton Bertulang Normal dengan GFRP	20
1. Tinjauan umum	20
2. Karakteristik material GFRP	22
3. Bahan perekat	24
4. Metode kegagalan	25
5. Kapasitas balok beton bertulang dengan FRP (ACI 440-2R-02)	25
E. Strain Gauge	26
F. Pembebanan Fatik	29
1. Faktor yang mempengaruhi fatik	33
2. Faktor metalurgi yang mempengaruhi ketahanan fatik	35
3. Ciri patah lelah	36
BAB III METODE PENELITIAN	38
A. Jenis Penelitian dan Desain Penelitian	38
1. Jenis penelitian	38
2. Desain penelitian	39
3. Parameter pengujian	40
4. Set up pengujian	40
B. Kerangka Prosedur Penelitian	44
C. Lokasi dan Waktu Penelitian	45

D. Bahan dan Alat Penelitian	45
E. Prosedur Penelitian	45
1. Pembuatan benda uji	45
2. Pengujian karakteristik beton	46
3. Uji fisik material baja	46
4. Uji fisik balok uji	47
<b>BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN</b>	<b>50</b>
A. Kuat Tekan Beton dan Kuat Lentur	50
B. Pengujian Tarik Baja Tulangan	51
C. Hasil Penelitian dan Analisis Balok Uji	52
1. Balok uji B 1	52
2. Balok Uji A 1	55
3. Balok Uji A 2	67
4. Balok Uji B 2	68
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	<b>85</b>
A. Kesimpulan	85
B. Saran	86
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	<b>87</b>

**DAFTAR TABEL**

<b>nomor</b>		<b>halaman</b>
1.	Kontrol terhadap lendutan SNI-Beton-2002	17
2.	Karakteristik material resin epoxy	23
3.	Hubungan kekasaran pekerjaan dengan kondisi fisik	34
4.	Hasil pengujian baja tulangan	51
5.	Perbandingan Nilai lendutan pada pembebanan statik dan fatik tanpa GFRP	71
6.	Perbandingan Nilai lendutan pada pembebanan statik dan fatik tanpa GFRP	78

**DAFTAR GAMBAR**

<b>Nomor</b>		<b>halaman</b>
1.	Kerangka pikir	8
2.	Grafik tegangan – regangan beton	10
3.	Diagram tegangan – regangan beton bertulang tanpa beban	10
4.	Diagram tegangan – regangan beton bertulang sebelum runtuh	11
5.	Diagram tegangan – regangan beton bertulang setelah runtuh	12
6.	Tegangan dalam beton bertulang	13
7.	Reaksi Vu	18
8.	Pola retak balok beton bertulang	18
9.	Jenis bahan pelekat SHE-51	24
10.	Detail matriks strain gauge	28
11.	Strain gauge dalam kemasan beserta bungkusnya	29
12.	Pola khas beban berulang	30
13.	Deskripsi proses fatik	31
14.	Kurva S – N	32
15.	Tegangan sisa	34
16.	Profil memanjang dan melintang balok uji	39
17.	Instrumentasi pengujian beban statik	41
18.	Instrumentasi pengujian beban fatik	43
19.	Kerangka prosedur penelitian	44

20.	Profil memanjang balok uji B 1	47
21.	Profil memanjang balok uji A 1	48
22.	Profil memanjang balok uji A 2	48
23.	Profil memanjang balok uji B 2	49
24.	Pengujian sampel beton	51
25.	Pengujian tarik baja	51
26.	Grafik hubungan antara beban (P) – regangan ( $\mu$ ) beton	53
27.	Grafik hubungan antara beban (P) – regangan ( $\mu$ ) baja tulangan	54
28.	Grafik hubungan antara beban (P) – lendutan ( $\delta$ ) balok uji	55
29.	Grafik hubungan antara beban (P) – regangan ( $\mu$ ) beton	56
30.	Hubungan antara beban (P) – regangan ( $\mu$ ) baja tulangan	57
31.	Grafik hubungan antara beban (P) – lendutan ( $\delta$ ) balok uji	58
32.	Regangan – tegangan balok uji kondisi leleh	58
33.	Pola retak balok normal A 1	59
34.	Grafik hubungan antara beban (P) – retak balok uji	60
35.	Grafik hubungan antara beban (P) – regangan beton balok uji GFRP	62
36.	Grafik hubungan antara beban (P) – regangan ( $\mu$ ) balok GFRP	63
37.	Grafik hubungan antara beban (P) – lendutan ( $\delta$ ) balok uji GFRP	63

38.	Grafik hubungan antara beban (P) – regangan GFRP ( $\mu$ ) balok uji	64
39.	Pola retak balok uji A 1 dengan GFRP	65
40.	Grafik hubungan antara beban (P) – retak balok uji	66
41.	Regangan – tegangan balok uji dengan GFRP	67
42.	Grafik hubungan antara beban (P) – lendutan ( $\delta$ ) balok uji GFRP luas lekatan full	68
43.	Dokumentasi kondisi pengujian fatik	69
44.	Grafik hubungan log cycle dengan lendutan tengah bentang balok uji	70
45.	Grafik hubungan log cycle dengan regangan beton Cu	72
46.	Grafik hubungan log cycle dengan regangan beton C1	73
47.	Grafik hubungan log cycle dengan regangan beton C2	74
48.	Grafik hubungan log cycle dengan regangan baja tulangan	75
49.	Regangan – tegangan balok uji kondisi leleh pembebanan fatik	76
50.	Pola retak pembebanan fatik	76
51.	Grafik hubungan log cycle dengan lendutan balok uji GFRP pembebanan fatik	77
52.	Grafik hubungan log cycle dengan regangan beton Cu GFRP	79
53.	Grafik hubungan log cycle dengan regangan beton C1 GFRP	80
54.	Grafik hubungan log cycle dengan regangan beton C2 GFRP	81
55.	Grafik hubungan log cycle dengan regangan pada	

	balok uji GFRP	82
56.	Kurva tegangan-regangan balok uji GFRP pembebanan fatik	82
57.	Dokumentasi kerusakan pada benda uji perkuatan GFRP pembebanan static dan fatik	84



**DAFTAR LAMPIRAN**

<b>nomor</b>		<b>halaman</b>
1.	Hasil uji karakteristik beton	89
2.	Hasil uji karakteristik baja	94
3.	Hasil pengujian balok uji	100
4.	Profil GFRP SEH51	115
5.	Prosedur alat uji statik	118
6.	Prosedur alat uji fatik	134

## DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/singkatan	Arti dan keterangan
A	Luas penampang
a	Blok tekan
As	Luas tulangan tarik
ASTM	American society for testing and Materials
b	Lebar Penampang
c	Jarak tepi luar atas terhadap garis netral
d	Selimut Beton
EI	Modulus elastistas x inersia penampang
Es	Modulus elastisitas baja
Ey	Modulus elastisitas baja tulangan
f'c	Kuat tekan beton
f'y	Tegangan leleh baja
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
GFRP-S	Glass Fiber Reinforced Polymer Sheet
h	Tinggi balok

L	Panjang balok
Mm	Millimeter
Mn	Momen nominal
M <sub>nf</sub>	Momen nominal FRP
M <sub>ns</sub>	Momen nominal akibat baja
P	Beban
SNI	Standar Nasional Indonesia
T	Tegangan
V <sub>c</sub>	Kekuatan geser nominal sumbangan beton
V <sub>s</sub>	Kekuatan geser nominal sumbangan tulangan geser
V <sub>u</sub>	Gaya vertikal tumpuan balok
ε <sub>s</sub>	Tegangan Baja
ε <sub>y</sub>	Regangan leleh baja
ΦMn	Momen reduksi tetap

# BAB I

## PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Perkuatan pada konstruksi beton bertulang menjadi hal yang sangat penting, terlebih pada struktur yang telah mengalami penurunan kekuatan akibat umur, pengaruh lingkungan, perubahan fungsi struktur, desain awal yang kurang, kelemahan perawatan, ataupun kejadian-kejadian alam seperti gempa bumi.

Saat ini, perhitungan respon suatu desain hanya didasarkan pada beban-beban dan gangguan-gangguan lingkungan yang spesifik. Apabila asumsi-asumsi analisis dan tegangan-tegangan hitung yang diamati ada pada batas-batas yang diijinkan maka desainer akan menyimpulkan bahwa rancangan aman tanpa memandang berapa kali beban-beban tersebut diaplikasikan.

Masa guna elemen struktur beton bertulang bisa diartikan bahwa elemen struktur beton bertulang sudah tidak mampu menahan beban berulang. Untuk jembatan jalan raya (*Highway bridge*), beban kendaraan dalam waktu tertentu dapat menyebabkan retak mikro, perambatan retak (*crack propagation*) dan akhirnya mengalami keruntuhan (*failure*) bila keadaan batas lelah (*fatigue limit state*) terlampaui. Pada struktur lepas pantai, beban lingkungan yang ada terutama beban akibat gelombang yang bersifat siklik dan juga dapat terjadi karena gerakan dari struktur itu

sendiri yang berlangsung secara berulang-ulang. Oleh sebab itu diperlukan adanya analisa kelelahan struktur akibat beban berulang maupun siklik pada sebuah struktur.

Berdasarkan pengamatan ternyata pembebanan berulang (*repeated loading*) akan memperlemah suatu struktur pada waktu tertentu (bulanan hingga tahunan) walaupun tegangan yang terjadi pada bagian tersebut lebih kecil dari batas tegangan yang diijinkan. Setiap siklus dari fluktuasi tegangan memperlemah objek tersebut hingga pada beberapa besaran (derajat). Setelah sejumlah siklus, objek menjadi semakin lemah dan kemudian gagal. Fenomena ini dikenal sebagai fatik (*fatigue*).

Korosi tulangan baja merupakan salah satu masalah utama yang dihadapi dalam proses konstruksi saat ini. Banyak metode telah coba digunakan untuk meminimalkan masalah tapi tidak berhasil. Dengan demikian, sangat dibutuhkan metode perkuatan struktur yang tahan lama untuk menggantikan konvensional baja. Glass Fiber Reinforced Polymer Sheet (GFRP-S) adalah material yang terbuat dari kaca yang berkarakteristik memiliki kekuatan tarik tinggi, tahan korosi dan serangan kimia.

Setelah membaca dan mencermati sejumlah hasil penelitian bidang struktur, terjadi peningkatan penelitian perkuatan struktur dengan GFRP untuk 10 tahun terakhir. Sehingga, pada penelitian ini penulis bermaksud mempelajari kapasitas kekuatan lentur balok beton bertulang dalam menerima jenis pembebanan bergoyang (*Fatigue*) dengan

perkuatan GFRP. Penelitian ini akan dilakukan pada balok skala penuh (full scale) dengan ukuran 300 x 500 x 6000 mm.

### **B. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Perilaku Lentur dari balok ketika menerima beban fatik dengan perkuatan Glass Fiber Reinforced Polymer Sheet (GFRP-S).
2. Efek perkuatan balok beton bertulang menggunakan Glass Fiber Reinforced Polymer Sheet (GFRP-S) dalam menerima beban fatik.

### **C. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Untuk mengetahui pengaruh beban fatik terhadap kapasitas lentur balok beton bertulang skala penuh (full-scale) dengan ukuran 300x500x6000 mm.
2. Untuk mengetahui efek perkuatan menggunakan GFRP terhadap ketahanan pada pembebanan fatik balok beton bertulang berskala penuh (full-scale) dengan ukuran 300x500x6000 mm.

#### **D. Manfaat Penelitian**

1. Memberikan informasi perilaku lentur balok beton bertulang oleh pembebanan fatik.
2. Memberikan informasi pengaruh perkuatan GFRP pada balok beton bertulang dengan pembebanan fatik.
3. Memberikan alasan, perlunya peninjauan umur fatik pada struktur dan analisis perkuatan dengan GFRP.

#### **E. Ruang Lingkup**

Untuk mencapai tujuan penelitian di atas, maka dilakukan uji eksperimental balok beton bertulang skala penuh (*full scale*) untuk mengetahui kapasitas lentur balok pada pembebanan fatik yang telah direkatkan dengan instrumentasi strain gauge dan perkuatan GFRP-S.

Pembatasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Jenis bahan uji berupa balok beton bertulang skala penuh (*full scale*) dengan dimensi 300x500x6000 mm sebanyak 4 buah, dimana 1 buah benda uji sebagai balok uji control, 2 buah pada pembebanan statik dengan variasi GFRP, dan 1 buah pada pembebanan fatik. .
2. Tulangan yang digunakan adalah tulangan tunggal.
3. Kerusakan balok yang akan diperkuat dengan GFRP-S dalam kondisi baja tulangan leleh.

4. Jenis pembebanan fatik minimum 75 kN dan maksimum 260 kN dengan frekuensi 1.25 Hz.

## **F. Sistematika dan Organisasi**

- BAB I** Pendahuluan memaparkan latar belakang masalah dilakukannya penelitian, rumusan masalah menjelaskan permasalahan yang perlu diamati, manfaat penelitian menjelaskan pentingnya hasil penelitian bagi pengembangan ilmu dan pembangunan konstruksi ke depan, ruang lingkup sebagai batasan dalam penulisan, serta sistematika dan Organisasi tentang pengenalan isi per bab dalam tesis.
- BAB II** Tinjauan Pustaka menjelaskan sistematika penulisan, hasil penulisan sebelumnya.
- BAB III** Metode Penelitian menerangkan waktu, lokasi penelitian, bahan dan alat penelitian, serta metode analisis.
- BAB IV** Hasil Penelitian dan Pembahasan menyajikan data hasil penelitian dan analisis data itu sendiri untuk mencapai hasil penelitian.
- BAB V** Kesimpulan dan Saran berisikan simpulan hasil analisis data penelitian dan saran sebagai hasil pandangan penelitian yang telah dilakukan sehubungan dengan tujuan penelitian.



## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **A. Hasil Penelitian Sebelumnya**

Telah dilakukan studi eksperimental pada perkuatan struktur beton bertulang menggunakan Fiber Reinforced Polymer oleh Sungwoo Shin et al. (2009), hasil penyelidikan dapat diringkas sebagai berikut :

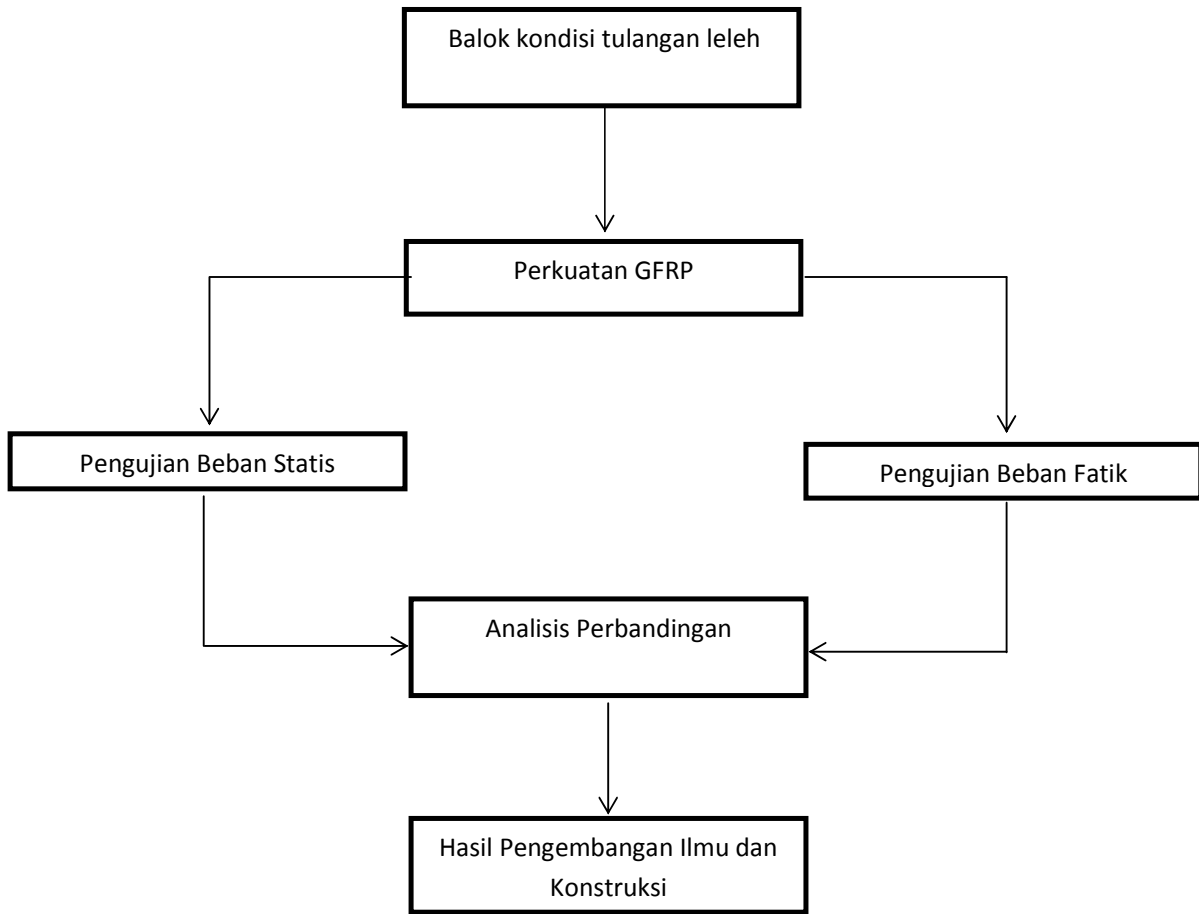
1. Kekuatan beton memiliki efek yang dapat diabaikan pada jarak retak dan lebar retak.
2. FRP pada perkuatan balok beton dalam penelitian ini adalah aman untuk desain dalam hal deformabilitas.

Telah dilakukan penyelidikan dan mengevaluasi balok kantilever dengan perkuatan GFRP oleh Mohammed et al. (2011). Parameter utama adalah jenis baja tulangan (baja atau GFRP), kekuatan beton dan rasio GFRP tulangan. Hasil eksperimen adalah perbandingan kapasitas lentur teoritis dan hasil penelitian. Perbandingan ini menunjukkan bahwa analisis teoritis memberikan hasil sekitar 30% lebih rendah dari kapasitas lentur eksperimental.

Pada benda uji balok beton bertulang dengan perkuatan lentur GFRP-S oleh Fikri Alami (2010), Febby Bukorsyom (2011) didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Peningkatan kekuatan kapasitas momen ultimit balok dengan perkuatan GFRP dengan nilai rata-rata lebih dari 50% kekuatan balok normal tanpa GFRP.
2. Kemampuan balok beton bertulang dengan GFRP memiliki sifat lebih daktil untuk menahan deformasi, dan tersimpulkan bahwa terjadi penurunan daktilitas balok akibat penambahan jumlah lapisan GFRP.
3. Pola retak yang terjadi pada balok beton bertulang dengan GFRP adalah pola retak lentur. Pada balok yang mengalami retak, penambahan GFRP mampu menghambat perambatan retakan menuju blok tekan beton. Hal ini menunjukkan bahwa GFRP memiliki kemampuan untuk memperlambat keruntuhan/kegagalan balok yang telah rusak.

**B. Kerangka Pikir**



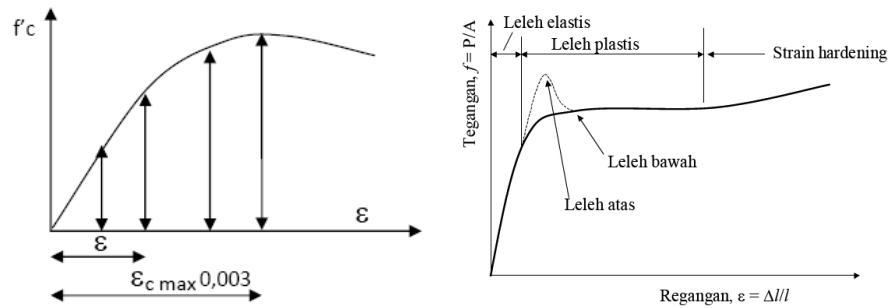
Gambar 1. Kerangka pikir

## C. Beton Bertulang

### 1. Teori analisa penampang beton bertulang

Asumsi-asumsi dalam analisis beton (keadaan batas) adalah :

- a. Penampang yang semula rata akan tetap rata setelah terjadi deformasi atau perubahan bentuk sampai beton mengalami kehancuran dan tetap tegak lurus pada sumbu konstruksi .  
(asas *Bernouli*)
- b. Regangan-regangan di dalam penampang dianggap berbanding lurus dengan jaraknya ke garis netral (asas *Navier*)
- c. Pada keadaan batas tegangan tekan beton tidak sebanding dengan regangannya. Bentuk dari blok tegangan tekan beton berupa garis lengkung yang dimulai pada garis netral dan berakhir pada serat tepi yang tertekan, dimana tegangan tekan maksimum sebagai kekuatan tekan lentur beton pada umumnya tidak terjadi pada serat tepi.
- d. Ikatan antara beton dan tulangan akan tetap dipertahankan sampai saat kehancuran. Dalam hal ini berarti regangan yang terjadi di dalam beton sama dengan regangan yang terjadi di dalam baja tulangan ( $\epsilon_c = \epsilon_s$ ).
- e. Diagram tegangan – regangan beton sesuai pada grafik dan regangan maksimum yang terjadi di dalam beton,  $\epsilon_{ec}$  ( *max.* ) adalah 0,003.



Gambar 2. Grafik tegangan – regangan beton (Edi Wibowo, 2010)

Bila regangan  $\epsilon_s$  lebih kecil dari  $\epsilon_y$  (regangan leleh) diperoleh hubungan linier antara tegangan dan regangan :

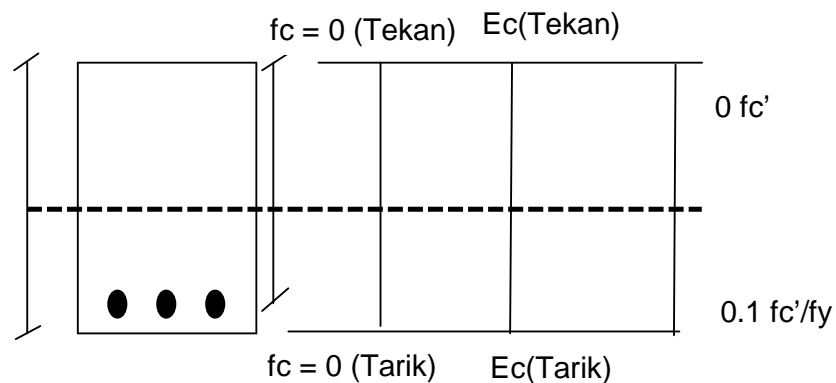
$$f'y = \epsilon_s \times E_s \text{ untuk } \epsilon_s \leq E_y$$

Setelah dicapai titik leleh berlaku rumus

$$f'c = f'y \text{ untuk } \epsilon_s > E_y$$

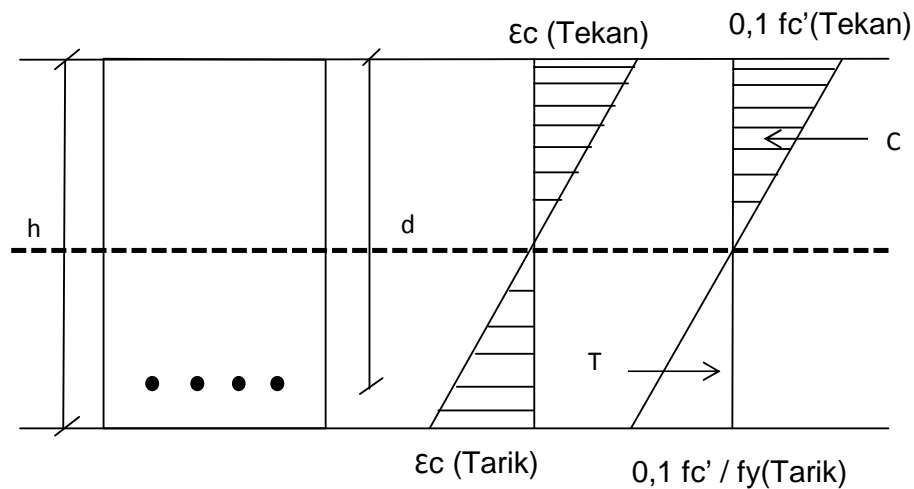
Tegangan di dalam tulangan tidak boleh melebihi tegangan leleh besi / baja.

Suatu penampang dengan kondisi seperti di bawah :



Gambar 3. Diagram tegangan – regangan beton bertulang tanpa beban

Sejara setelah tegangan tarik hancur beton tercapai pada serat balok yang tertarik, retak rambut akan terbentuk diawali dari dasar balok dan menjalar sampai pada penampang netral. Gaya normal yang bekerja pada penampang berupa tegangan tekan beton  $f'c$  di atas garis netral dan tegangan tarik tulangan  $f_y$  dibawah garis netral.

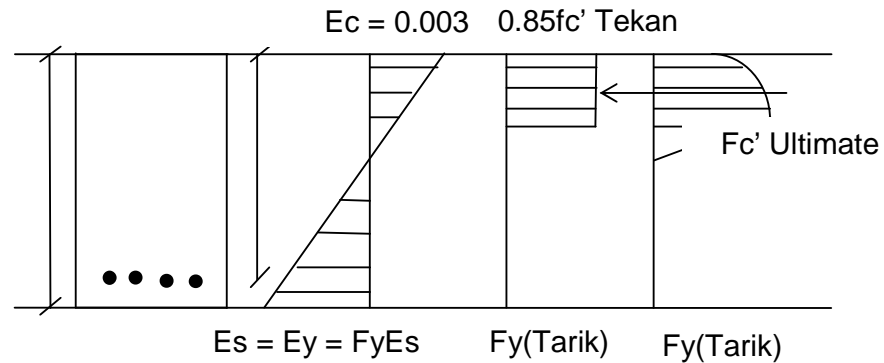


Gambar 4. Diagram tegangan – regangan beton bertulang sebelum runtuh

Pada penampang yang dilakukan penambahan beban, retak-retak pada daerah tertarik akan meningkat cepat sebagai akibat melelehnya tulangan.

Kehancuran gelagar akan terjadi karena :

- Regangan beton diserat teratas (serat tertekan) mencapai nilai maksimum 0.003.
- Regangan tulangan sama  $\epsilon_s$  dengan atau lebih besar dari  $\epsilon_s$  dengan atau lebih besar dari  $\epsilon_y$  dan tegangan tulangan sama dengan tegangan leleh  $f_y$ .



Gambar 5. Diagram tegangan – regangan beton bertulang setelah runtuh

Distribusi tegangan beton akan menyerupai tegangan-tegangan beton yang sebenarnya, dan linier. Sesaat setelah mencapai 0.003 beton akan hancur pada serat-serat teratas, tepat pada penampang kritis gelagar. Tegangan spesifik  $f'_c$  tidak terjadi pada serat balok teratas, tepat pada penampang kritis gelagar. Tegangan spesifik  $f'_c$  tidak terjadi pada serat balok teratas, tetapi sedikit ke bawah. Diasumsikan bahwa tulangan meleleh terlebih dahulu maka beban pada kondisi inilah yang merupakan beban terbesar yang dapat dipikul balok dan penampang dapat dikatakan telah mencapai kondisi kekuatan batasnya.

Letak garis netral "c" yang tidak diketahui dan dapat dihitung dengan keseimbangan gaya dalam

$$T = C \quad (1)$$

bila anggapan tulangan meleleh maka  $T = A_s \times f_y$ , sedangkan gaya tekan di dalam beton dapat dihitung dengan menggunakan integral luasan diagram tegangan.

$$C = \int fc \, dA = \int b \cdot fc \, dy = b \int fc \, dy \quad (2)$$

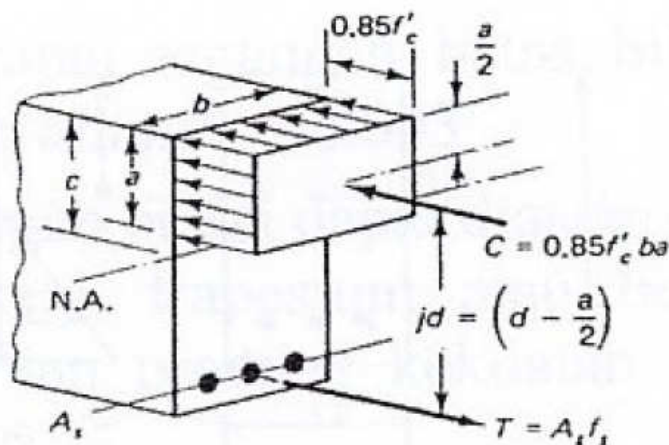
penyelesaian menggunakan integral selain rumit juga membutuhkan waktu lama, hingga dalam praktiknya sering digunakan suatu penyederhanaan distribusi tegangan berupa *stress block*.  $\int fc \, dy$  adalah luas diagram tegangan yang digantikan oleh *stress block* dengan tegangan merata sebesar  $0,85 f'_c$  serta kedalaman  $a$  dari serat blok teratas nilai merupakan fungsi dari jarak garis netral yang sebenarnya.

$$a = \beta_1 \cdot c \text{ dimana } 0 < \beta_1 < 1 \quad (3)$$

koefisien  $\beta_1$  ini diperoleh dengan mempersamakan luas *stress block* dengan luas diagram sebenarnya gaya tekan beton  $C$  pun dapat dihitung:

$$\int fc \, dy = a (0.85 f'_c) = \beta_1 \cdot c (0.85 f'_c) \quad (4)$$

$$C = b \int fc \, dy = ab (0.85 f'_c) \quad (5)$$



Gambar 6. Tegangan dalam beton bertulang



letak titik tangkap gaya tekan C pada diagram yang sebenarnya merupakan pula titik tangkap gaya tekan pada *stress block*, dan berjarak  $\frac{1}{2} a = \frac{1}{2} \beta_1 \cdot c$  dari serat teratas. Nilai koefisien  $\beta_1$  tergantung pada nilai mutu beton,  $\beta_1 = 0,85$  untuk mutu beton  $f'c < 30$  Mpa. jika  $f'c > 30$  Mpa maka digunakan rumus empiris sebagai berikut :

$$\beta = 0.85 - \left( \frac{f'c - 30}{7} \right) \times 0.005 \quad (6)$$

$$T = f_y \cdot A_s \quad (7)$$

$$C = 0.85 \cdot f'c \cdot a \cdot b \quad (8)$$

$$a = \left( \frac{T}{0.85 \cdot f'c \cdot b} \right) \quad (9)$$

letak garis netral yang ditentukan, perbandingan antara regangan baja dengan beton maksimum ditetapkan berdasarkan distribusi regangan linier. Letak garis netral tergantung pada jumlah tulangan baja tarik yang dipasang pada suatu penampang.

Pada saat beton dalam keadaan *underreinforced* dimana tulangan baja tarik kurang dari yang diperlukan, maka  $\epsilon_s$  yang diperoleh akan lebih besar dari regangan leleh atau kehancuran balok diawali dengan melelehnya tulangan. Letak garis netral pada kondisi *underreinforced* berada diatas garis netral pada keadaan seimbang.

Pada kondisi *overreinforced* dimana tulangan baja tarik yang dipasang lebih besar dari yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan, letak garis netral bergeser ke bawah. Kehancuran beton pada kondisi *overreinforced* akan terjadi keruntuhan secara mendadak.

## 2. Teori underreinforced, overreinforced dan balance steel ratio

Sebuah balok yang memiliki perbandingan tulangan yang seimbang adalah balok yang tulangan tariknya secara teoritis akan mulai meleleh dan beton tekannya (*compression concrete*) mencapai tegangan *ultimate* pada tingkat beban yang persis sama. Jika balok mempunyai lebih sedikit tulangan dari pada yang diperlukan untuk suatu perbandingan seimbang, balok itu disebut *underreinforced*, jika tulangannya lebih banyak maka balok disebut balok *overreinforced*.

Jika sebuah balok berada dalam keadaan *underreinforced* dan beban *ultimate* sudah hampir tercapai, baja akan mulai meleleh meskipun tegangan pada beton tekan masih belum mencapai tegangan *ultimate*-nya. Jika beban terus diperbesar, baja akan terus memanjang sehingga mengakibatkan lendutan dan retak besar pada beton tarik. Akibatnya, pengguna struktur akan mengetahui bahwa beban harus dikurangi atau jika tidak struktur akan rusak parah bahkan bisa runtuh. Jika beban ditingkatkan lebih jauh lagi, retak tarik akan menjadi lebih besar lagi dan pada akhirnya beton tekan akan mengalami kelebihan tegangan dan runtuh.

Jika sebuah balok berada dalam keadaan *overreinforced*, tulangan tarik tidak akan meleleh sebelum keruntuhan terjadi. Ketika beban bertambah, tidak akan terjadi lendutan meskipun beton tekan telah mengalami kelebihan tegangan sehingga keruntuhan akan terjadi secara tiba-tiba tanpa peringatan bagi para pengguna struktur. Balok persegi

akan runtuh pada daerah tekan ketika regangan yang terjadi sekitar 0,003 sampai 0,0035 untuk mutu beton biasa. Oleh karena itu situasi *overreinforced* harus dihindari sebisa mungkin, sehingga para perencana menggunakan situasi *underreinforced* agar jenis daktail dari keruntuhan akan memberikan “waktu menghindar” yang cukup.

### 3. Geser dan lentur dalam beton bertulang

Tujuan perencanaan beton bertulang bertujuan untuk menghasilkan batang daktail yang memberikan peringatan dari keruntuhan mendadak. Keruntuhan balok bertulang dalam geser adalah sangat berbeda dengan dengan keruntuhan lentur, keruntuhan geser terjadi secara tiba-tiba dengan peringatan kecil atau tanpa peringatan sebelumnya. Oleh karena itu balok direncanakan runtuh dalam lentur, sehingga balok *underreinforced* akan runtuh secara daktail. Pada balok beton bertulang tegangan sebanding dengan regangan, terjadi dua macam tegangan yaitu, tegangan lentur dan tegangan geser. Dan dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$f = \frac{Mc}{I} \quad (10)$$

$$v = \frac{VQ}{Ib} \quad (11)$$

Lendutan adalah fungsi dari kekakuan yaitu perkalian antara modulus elastisitas beton  $E_c$  dengan inersia penampang  $I$ , lebih populer dengan istilah  $EI$ . Lendutan itu harus dibatasi, karena itu menyangkut masalah kenyamanan maupun seni dalam seni arsitektur. SNI-Beton-2002

kali ini dengan tegas membuat butir tersendiri, yaitu kontrol terhadap lendutan.

Tabel 1. Kontrol terhadap lendutan SNI-Beton-2002 (SNI-Beton-2002)

Komponen Struktur	Tebal minimum, h			
	Dua tumpuan sederhana	Satu ujung menerus	Kedua ujung menerus	Kantilever
Komponen yang tidak menahan atau tidak disatukan dengan partisi atau konstruksi lain yang mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar				
Pelat masif satu arah	L/20	L/24	L/28	L/10
Pelat rusuk satu arah	L/16	L/18.5	L/21	L/8

Sumber : SNI-Beton-2002

Jika lendutan harus dihitung, maka lendutan yang terjadi seketika (immediate deflection) dihitung dengan metode atau formula standar untuk lendutan elastis dengan memperhitungkan pengaruh retak dan tulangan terhadap kekakuan struktur.

#### 4. Rumusan gaya geser dalam balok beton bertulang

Jika  $V_u$  dibagi dengan luas balok rata-efektif  $bwd$ , hasilnya adalah tegangan geser rata-rata. Tegangan ini tidak sama dengan tegangan tarik diagonal tetapi hanya sebagai indikator besarnya, jika nilai indikator ini melampaui nilai tertentu, tulangan geser dianggap perlu. Kekuatan geser teoritis batang dilambangkan dalam bentuk  $V_n$ ,  $V_n$  merupakan kontribusi dari kekuatan yang diberikan beton dan tulangan geser. Tegangan geser

rata-rata harus dikalikan dengan luas balok efektif untuk mendapatkan gaya geser.

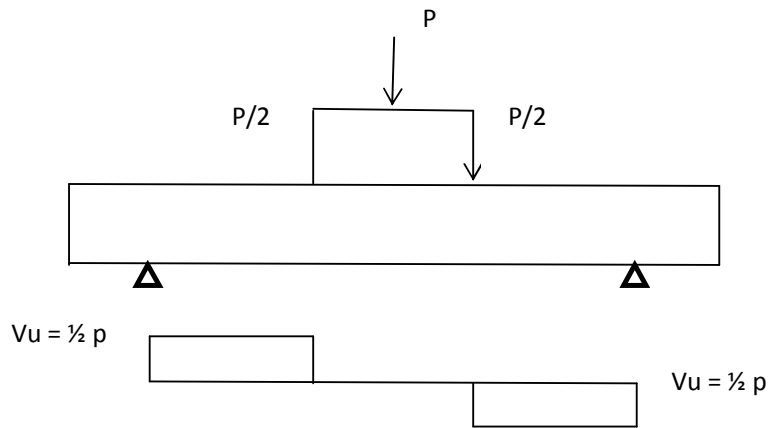
$$V_n = V_c + V_s; \tag{12}$$

$V_c$  = kekuatan geser nominal sumbangan beton

$V_s$  = kekuatan geser nominal sumbangan tulangan geser

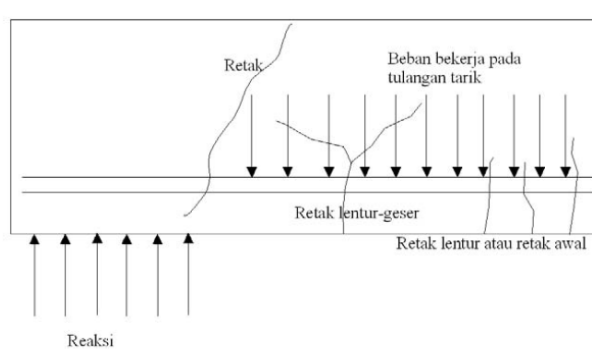
$$V_c = 1/6 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \dots \dots \dots v_c = V_c / b_w \cdot d \tag{13}$$

$$V_s = \frac{A_s \cdot f_y \cdot d}{s} \dots \dots \dots s = L / (n-1) \tag{14}$$



Gambar 7. Reaksi  $V_u$

**5. Pola retak dalam balok beton bertulang**



Gambar 8. Pola retak balok beton bertulang (Edi Wibowo,2010)

Pada gambar diatas, tampak pola-pola retak akibat dari lebihnya muatan beban rencana. Dalam perencanaan biasanya direncanakan untuk terjadi retak lentur, tetapi retak miring dapat terjadi pada balok beton bertulang sebagai kelanjutan dari retak lentur atau kadang-kadang sebagai retak independen (karena tidak dipasangnya tulangan geser). Retak geser kadang-kadang terjadi pada titik-titik belok dari balok menerus atau dekat tumpuan sederhana (seperti halnya pada percobaan). Ditempat-tempat tersebut sering terjadi momen kecil dan geser tinggi, dan pada sumbu netral jika tegangan lentur adalah nol maka geser mencapai nilai maksimum. Oleh karena itu tegangan geser akan menentukan apa yang terjadi dengan retak di tempat itu. Setelah retak berkembang, balok akan runtuh kecuali jika penampang beton yang retak dapat menahan gaya yang bekerja. Jika tidak ada tulangan geser atau sengkang, bagian yang dapat mentransfer geser adalah sebagai berikut :

1. Kekuatan geser dari penampang tak retak diatas bagian yang retak (diperkirakan 20%-40%) dari kekuatan total.
2. Kunci agregat, yaitu friksi yang terjadi akibat kunci agregat pada permukaan beton di sisi retak yang berlawanan (diperkirakan 33%-50% dari total).
3. Kekuatan tulangan longitudinal terhadap gaya friksi, yang sering disebut gaya pengait atau *dowel action* (diperkirakan 15%-25%).
4. Perilaku jenis pengikat lengkung yang terjadi dalam balok tinggi yang dihasilkan oleh tulangan longitudinal yang bekerja sebagai pengikat

dan dari beton tak retak di atas dan di sisi retak yang bekerja sebagai pelengkung.

#### **D. Balok Beton Bertulang Normal dengan GFRP**

##### **1. Tinjauan umum**

Pengembangan material komposit FRP merupakan model perkembangan perkuatan struktur yang cukup baik. Terdapat beberapa jenis material alami lainnya seperti goni. Teknik perkuatan seperti ini dapat dibuat efisien, tidak menyebabkan karat seperti plat baja external. Fungsi perkuatan dengan sistem komposit FRP adalah untuk meningkatkan kekuatan atau memberikan peningkatan kapasitas lentur, geser, axial dan daktilitas, atau berbagai kombinasi diantaranya. Daya tahan FRP yang tinggi lebih ekonomis digunakan pada lingkungan korosif dimana baja akan mudah berkarat. Penggunaan FRP lebih populer mengingat banyaknya keuntungan yang dapat diperoleh seperti bobot unit yang kecil, mudah diaplikasikan dan ditangani, biaya instalasi dan pemeliharaan yang rendah. Kerugian yang paling prinsip penggunaan FRP sebagai sistem perkuatan adalah harga material yang relatif lebih mahal. Pada situasi tertentu, bagaimanapun, FRP memberikan jalan keluar yang paling ekonomis dalam masalah perkuatan karena secara dramatis dapat menekan biaya tenaga kerja (Meier and Erki, 1997). FRP dapat digunakan untuk meningkatkan kapasitas lentur dan geser balok beton bertulang, lentur pelat, desak, geser dan lentur kolom. FRP dalam bentuk

lembaran, plat atau batangan dapat dipasang pada permukaan balok atau plat yang mengalami peregangan sebagai perkuatan lentur. Sebagai perkuatan geser balok, lembaran FRP dapat direkatkan pada sisi balok. Penggunaan pada kolom, lembaran FRP atau pelapisan dapat ditempatkan pada bagian luar kolom untuk meningkatkan daktilitas dan kekuatan.

Produk FRP yang terbuat dari kaca lebih dikenal dengan Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP-S). GFRP-S terbuat dari kaca cair yang dipanaskan sekitar 2300°F dan dipintal dengan bantuan Bushing Platinumrhodium pada kecepatan 200 mph.

Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Composite merupakan salah satu solusi yang banyak dipakai pada saat ini di dunia. Walaupun material ini cukup mahal namun banyak keuntungan yang dapat diberikan bila menggunakan GFRP yaitu merupakan material yang tahan korosi, mempunyai kuat tarik yang tinggi, superior dalam daktilitas, beratnya ringan sehingga tidak memerlukan peralatan yang berat untuk membawanya ke lokasi, selain itu dalam pelaksanaan tidak mengganggu aktifitas yang ada pada daerah perbaikan struktur tersebut.

Sebagai penguatan eksternal, GFRP-S tipe lembaran digunakan untuk:

- a. Perbaikan balok dan slab beton yang rusak, dengan asumsi bahwa debonding antara FRP dan beton tidak menyebabkan kegagalan elemen struktur.



- b. Mengatasi penambahan lebar retakan akibat peningkatan beban layanan.
- c. Meningkatkan kekuatan lentur akibat peningkatan beban seperti beban gempa dan beban lalu lintas.
- d. Merencanakan beton baru yang memiliki daktilitas tinggi.
- e. Perbaiki struktur akibat kesalahan desain atau konstruksi.
- f. Meningkatkan kemampuan geser beton.
- g. Meningkatkan kemampuan pengekangan kolom beton.
- h. Perbaiki struktur lama dan bersejarah.

## 2. Karakteristik Material GFRP

Material GFRP merupakan material perkuatan serat kaca dengan sejumlah jenis untuk aplikasi tertentu. Pada penelitian ini digunakan jenis *S* atau *R-Glass*, yang diproduksi untuk ekstra kekuatan tinggi dan modulus yang tinggi.

Beberapa faktor keunggulan/kelebihan penggunaan FRP (Hartono dan Sentosa 2003) antara lain :

- a. Kuat tarik sangat tinggi (+ 7 yd 10 kali lebih tinggi dari baja U39).
- b. Sangat ringan (density = 1,4 -2,4 gt/cm<sup>3</sup>,4 s/d 6 kali lebih ringan dari baja).
- c. Pelaksanaan pekerjaan sangat mudah dan cepat.

- d. Pada pekerjaan perbaikan/ perkuatan jembatan tidak memerlukan penutupan lalu-lintas.
- e. Tidak memerlukan area kerja yang luas.
- f. Tidak memerlukan sambungan joint walaupun bentang yang harus diperkuat cukup paqiane.
- g. Tidak berkarat.

Karakter material GFRP dapat diamati pada tabel 2 pada kondisi lepas dan komposit.

Tabel 2. Karakteristik material GFRP (Fyfo.Co LLC)

<b>SIFAT MATERIAL GFRP</b>				
KEADAAN LEPAS		KEADAAN KOMPOSIT		
SIFAT	NILAI	SIFAT	NILAI TEST	
MATERIAL	TEST	MATERIAL	TEST	DESAIN
Tegangan Tarik	3.24 Gpa	Tegangan Ultimate dalam arah utama	575 Mpa	460 Mpa
Modulus Tarik	72.4 Gpa	Regangan	2.20%	2.20%
Regangan Maks	4.50%	Modulus Tarik	26.1 Gpa	20.9 Gpa
Kerapatan	2.55 g/cm <sup>3</sup>	Tegangan Tarik Ultimate 90° dari	25.8 Mpa	20.7 Mpa
Tebal Fiber	0.36 mm	Tebal Komposit	1.3 mm	1.3mm

Sumber : Fyfo.Co.LLC

### 3. Bahan Perekat

Bahan perekat adalah larutan yang digunakan untuk merekatkan serat fiber pada beton atau objek yang ingin diperkuat. Campuran bahan perekat terdiri dari bahan padat dan cair yang saling larut. Campuran komponen A dan komponen B dengan perbandingan 1 : 0.46. Bahan perekat yang digunakan pada penelitian ini adalah type SEH-51 dengan ultimate tensile strength dalam arah serat utama sebesar 575 MPa, dan tensile modulus sebesar 26.1 Gpa. Ketebalan 1 lapis komposit ini dalam aplikasi adalah 1.33 mm.



Gambar 9. Jenis bahan perekat SEH-51

#### 4. Metode kegagalan

Beberapa metode kegagalan yang sering terjadi pada balok yang diperkuat dengan FRP yaitu :

- a. Rusaknya FRP setelah tulangan tarik meleleh.
- b. Hancurnya beton sekunder setelah tulangan tarik meleleh.
- c. Inti beton rusak karena tekanan sebelum tulangan tarik meleleh.
- d. Lepasnya ikatan antara FRP dan beton (debonding)

#### 5. Kapasitas balok beton bertulang dengan FRP (ACI 440-2R-02)

Untuk perkutan lentur dengan FRP, perhitungan desain mengacu pada ACI committee 440. Perhitungan tersebut disajikan dalam rumus-rumus berikut. Dalam mendesain kekuatan lentur diperlukan faktor reduksi terhadap momen yang terjadi. Dalam mendesain kekuatan lentur diperlukan faktor reduksi terhadap momen yang terjadi.

$$\phi M_n \geq M_u \quad (15)$$

Untuk melindungi kemampuan lekatan FRP diberikan persamaan untuk menghitung koefisien lekatan yaitu :

$$k_m = \frac{1}{60 \epsilon_{fu}} \left( 1 - \frac{n E_f t_f}{360000} \right) \leq 0.90 \text{ untuk } n E_f t_f \leq 180000 \quad (16)$$

Dengan memberikan asumsi bahwa nilai regangan maksimum pada beton sebesar 0,003, maka regangan yang terjadi pada FRP dapat dihitung dengan persamaan (17).

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left( \frac{h-x}{x} \right) - \epsilon_{bi} \leq k_m \epsilon_{fu} \quad (17)$$

Setelah mendapatkan nilai regangan pada FRP, nilai tegangan pada FRP dapat dihitung dengan persamaan (18).

$$F_{fe} = E_f \epsilon_{fe} \quad (18)$$

Dengan menggunakan persamaan (19) dan (20) nilai regangan dan nilai tegangan pada tulangan dapat dihitung. Setelah diketahui nilai regangan dan tegangan pada tulangan dan FRP, posisi garis netral dapat dicek berdasarkan gaya dalam yang terjadi dengan menggunakan persamaan (21).

$$\epsilon_s = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left( \frac{d - c}{h - c} \right) \quad (19)$$

$$f_s = E_f \epsilon_{fe} \quad (20)$$

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f_c \beta_1 b} \quad (21)$$

Kapasitas momen nominal perkuatan lentur dengan menggunakan FRP dapat dihitung dengan persamaan (22). Untuk perkuatan lentur ACI committee 440 merekomendasikan nilai faktor reduksi untuk FRP ( $\omega_f$ ) sebesar 0,85.

$$M_n = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \omega_f A_f f_{fe} \left( h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (22)$$

### E. Strain Gauge

Semua bentuk pengukuran regangan umumnya berkaitan dengan pengukuran perubahan panjang dari suatu panjang. Untuk suatu kondisi regangan yang konstan atau linear pengukuran tidak akan menghasilkan error. Namun untuk regangan yang quadratic, cubic atau quartic,

pengukuran ini akan menghasilkan error, yang besarnya bergantung pada panjang alat ukur yang digunakan dan kondisi medan regangan. Untuk meminimumkan error ini, pengukuran sebaiknya dilakukan dengan panjang alat yang seminimum mungkin.

Berdasarkan hal tersebut maka suatu alat ukur regangan harus memiliki karakteristik dasar sebagai berikut : memiliki panjang dan lebar alat ukur yang tidak terlalu besar, memiliki sensitivitas atau nilai regangan terkecil yang dapat dibaca pada skala di mana sensitivitas dapat ditingkatkan dengan menerapkan faktor pembesaran, memiliki rentang pembacaan yang nilai terbesar dapat dibaca, memiliki akurasi hasil bacaan. Salah satu alat ukur regang yang memenuhi karakteristik dasar tersebut adalah strain gauge atau *Electrical Resistance Strain Gauges (ERSG)*.

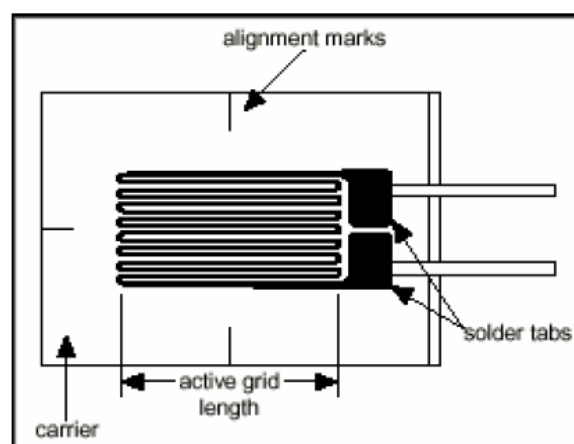
ERSG merupakan salah satu sistem ukuran regangan yang memperlihatkan sifat-sifat alat ukur regangan yang optimum dan paling banyak/sering digunakan dalam pekerjaan analisis tegangan. ERSG juga banyak dimanfaatkan sebagai sensor pada sebagai transducer untuk pengukuran beban, torsi, tekanan dan percepatan. Prinsip kerja ERSG ditemukan oleh Lord Kelvin (1856), yaitu : "*perubahan tahanan pada suatu material (baja/copper) dapat terjadi akibat perubahan regangan pada material tersebut*". Tiga dasar pengukuran regangan dengan ERSG antara lain :

- a. Perubahan tahanan kawat sebagai fungsi perubahan regangan

- b. Material yang berbeda mempunyai sensitivitas perubahan tahanan yang berbeda
- c. Jembatan wheatstone merupakan rangkaian yang dapat digunakan untuk mengukur perubahan tahanan yang terjadi secara akurat.

Berdasarkan ukuran, strain gauge terbagi atas strain gauge ukuran pendek (ukuran terpendek = 0,2 mm) dan strain gauge ukuran panjang (ukuran terpanjang=102 mm).

ERSG yang ada pada saat ini biasanya terdiri suatu foil tipis (setebal 0,02 mm) yang direkatkan pada suatu backing material yang terkadang terbuat dari polyamida. Melalui backing material inilah biasanya ERSG direkatkan pada permukaan benda uji. ERSG mengukur perubahan panjang terhadap panjang gauge dan mengkonversinya menjadi regangan.

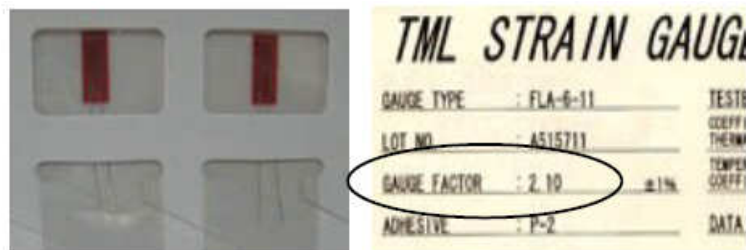


Gambar 10. Detail matriks strain gauge

Dalam eksperimental, regangan biasanya ditentukan dengan mengukur secara akurat perubahan tahanan dan kemudian membagi perubahan tahanan tersebut dengan faktor gauge-nya,  $F$  :

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} / F \quad (23)$$

Untuk mendefinisikan kondisi regangan bidang, perlu diketahui komponen-komponen regangan  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ , dan  $\gamma$ . Regangan geser  $\gamma_{xy}$  tidak dapat diukur langsung, namun dapat diperoleh dengan pengukuran regangan normal di tiga arah yang berbeda pada lokasi yang sama.



Gambar 11. Strain gauge dalam kemasan beserta bungkusnya

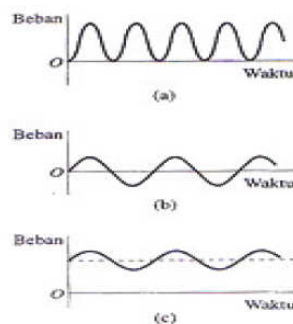
Strain gauge (Electrical Resistance Strain Gauge) yang digunakan adalah strain gauge (SG) produksi Tokyo Sokki Kenkyujo. SG digunakan untuk mengukur besarnya regangan yang terjadi, dan sifat penggunaannya umumnya adalah sekali pakai.

## F. Pembebanan Fatik

Fatigue adalah salah satu jenis kerusakan/kegagalan yang diakibatkan oleh beban berulang. Ada 3 fase di dalam kerusakan akibat fatigue yaitu : pengintian retak (crack initiation), perambatan retak (crack



propagation), dan patah statik (fracture). Formasi dipicu oleh inti retak yang dapat berawal dari lokasi yang paling lemah kemudian terjadi pembebanan bolak balik yang menyebabkan lokal plastisitas sehingga terjadi perambatan retak hingga mencapai ukuran retak kritis dan akhirnya gagal.



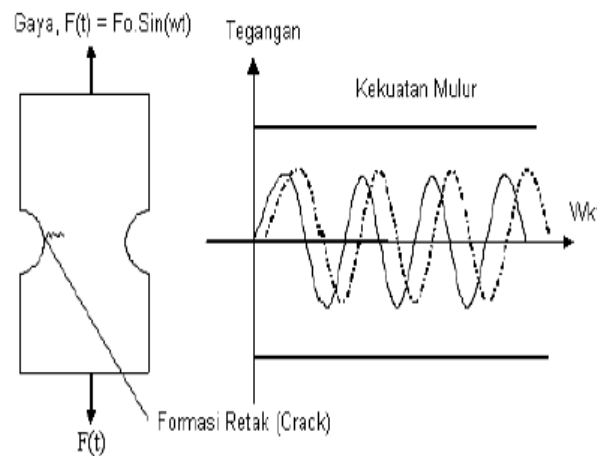
Gambar 12. Pola khas beban berulang (Wang, Chu – Kia, Charles G. Salmon)

Pola khas beban berulang ditunjukkan dalam Gambar 10 sebagai berikut :

- (1) Menunjukkan beban yang diterapkan, dihilangkan, dan ditetapkan lagi, selalu bekerja dalam arah yang sama.
- (2) Menunjukkan beban berganti yang berubah arah setiap siklus pembebanan.
- (3) Menggambarkan beban berfluktuasi yang bervariasi disekitar harga rata-rata.

Sedangkan Cecil (2004) menjelaskan proses fisik fatik, dari suatu specimen yang mendapatkan aksi tegangan tarik beresilasi pada magnitude yang cukup, maka retakan kecil akan berinisiasi, maka retakan

akan terus membesar dalam arah ortogonal terhadap arah beban tarik tersebut.



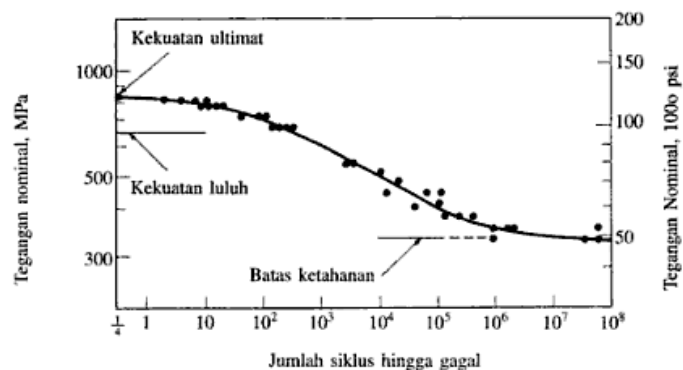
Gambar 13. Deskripsi proses fatik (Cecil, 2004)

Beban berulang biasanya terjadi pada jembatan jalan raya (*Highway bridge*), rel baja, struktur lepas pantai, dll. Beberapa jenis struktur ini mengalami jutaan (atau bahkan milyaran) siklus pembebanan selama masa gunanya.

Pengaruh beban berulang (*repeated load*) pada beban kerja (*working load*) sangat penting untuk beberapa struktur, terutama bila struktur berada dilingkungan yang korosif, yang mana dapat mengakibatkan kekuatan lekat (*bond strength*) antara baja tulangan dan beton berkurang sehingga lebar retak akan bertambah besar, selain itu juga kekuatan adhesi antara baja tulangan dan beton sekelilingnya menjadi hilang.

Pada kegagalan fatik yang khas, retak mikroskopik terbentuk titik dimana ada tegangan tinggi biasanya di pemusatan tegangan dan secara perlahan lahan membesar karena beban diberikan secara berulang-ulang. Apabila retak menjadi semakin besar sehingga bahan yang tersisa tidak menahan beban, maka fraktur tiba-tiba pada bahan terjadi dan tergantung pada sifat bahan, jumlah siklus untuk menghasilkan kegagalan fatik bisa bervariasi dari hanya sedikit saja hingga ratusan juta siklus.

Besarnya beban yang menyebabkan kegagalan fatik lebih kecil dari pada beban yang dapat ditahan secara statis untuk menentukan beban gagal, pengujian bahan harus dilakukan. Dalam penelitian ini, bahan diuji pada berbagai taraf tegangan dan banyaknya siklus hingga gagal. Data-data yang didapat akan digunakan untuk memplot kurva ketahanan, atau diagram S-N, dimana tegangan gagal (S) diplot versus banyaknya siklus (N) hingga gagal. Kurva ketahanan seperti terlihat pada gambar 14 menunjukkan bahwa semakin kecil tegangan, semakin banyak siklus yang menyebabkan kegagalan.



Gambar 14. Kurva S-N (R. E Peterson, ASTM Material Research and Standarts)

Di dalam memprediksi umur fatik, terdapat tiga pendekatan yaitu pendekatan tegangan (*stress approach*) atau dengan istilah lain pendekatan grafik S-N atau metode umur-tegangan (*stress life method*), pendekatan regangan (*strain approach*) atau istilah lain metode umur-regangan (*strain-life method*) dan pendekatan mekanika patahan (*fracture mechanics*).

## **1. Faktor yang mempengaruhi fatik**

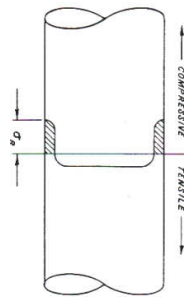
### **a. Dimensi.**

Bila ukuran specimen bertambah maka ketahanan fatigue kadang-kadang menurun. Hal ini ada beberapa alasan, kegagalan akibat fatigue biasanya dimulai dari permukaan. Penambahan ukuran specimen tentu menambah pula dimensi pada sisi permukaan. Jadi bila penambahan size dilakukan maka memberikan kemungkinan menimbulkan keberadaan cacat lebih besar, akibatnya retak berawal pada cacat tersebut. Sehingga untuk proses produksi specimen perlu kehati-hatian dan ketelitian untuk memperoleh hasil yang baik dan tidak memiliki cacat berupa retak awal. Kondisi ini bisa lebih diperhatikan pada proses perawatan.

### **b. Efek permukaan.**

Ketahanan fatigue sangat dipengaruhi oleh kondisi permukaan. Kondisi permukaan tersebut adalah sifat permukaan seperti perlakuan permukaan surface hardening dan tegangan sisa permukaan. Efek dari surface finishing atau kekasaran permukaan secara kualitatif juga mempengaruhi ketahanan fatigue. Tegangan sisa (*residual stress*)

terutamanya tegangan sisa tekan akan memberikan peningkatan ketahanan fatigue. Tegangan sisa ini dapat dikembangkan dengan melakukan deformasi plastis yang tidak seragam pada suatu penampang.



Gambar 15. Tegangan Sisa (Chandra, 2009)

Tabel 3. Hubungan kekasaran pekerjaan dengan kondisi fatik (Chandra 2009)

Operasi Pengerjaan akhir	Kekasaran Permukaan ( $\mu\text{m}$ )	Umur Fatik (Siklus)
Mesin bubut	105	24,000.00
Pemolesan sebagian dengan tangan	6	91,000.00
pemolesan dengan tangan	5	137,000.00
Gerinda	7	217,000.00
Gerinda dan Pemolesan	2	234,000.00

Hasil produksi specimen sering ditemukan wujud kekasaran yang juga cukup berpengaruh pada kondisi specimen memperoleh

pembebanan fatik. Hubungan antara kekasaran pengerjaan akhir sangat berpengaruh dengan umur fatik struktur. Pada contoh SAE 3130 dibawah tegangan pembalikan sempurna pada 95000 psi, menggambarkan efek pada tabel 3i.

## **2. Faktor metalurgi yang mempengaruhi ketahanan fatik**

Kelelahan bahan/fatigue sangat sensitif terhadap desain struktur. Ada beberapa faktor metalurgi yang berpengaruh terhadap ketahanan fatigue/*fatigue life*.

### **a. Ukuran butir.**

Ukuran butir akan mempengaruhi ketahanan fatigue terutama untuk material nonfero dan baja yang dianil. Bila ukuran butir semakin halus maka ketahanan fatiguenya akan meningkat. Namun tidak untuk baja tanpa notch yang diperlakukan panas, hal ini tidak ada pengaruhnya.

### **b. Struktur mikro.**

Perubahan struktur mikro akan mempengaruhi perubahan ketahanan fatigue, hal ini dikarenakan bila terjadi perubahan struktur mikro berarti akan terjadi perubahan fasa pada bahan. Karena bervariasinya fasa-fasa pada material maka akan memberikan perbedaan pengaruh terhadap ketahanan fatigue. Contoh pada baja yang di quench yang memiliki struktur mikro martensit temper akan memiliki ketahanan fatigue yang sangat baik

dibandingkan struktur mikro campuran seperti martensit-bainit atau ferit.

### **3. Ciri patah lelah**

Secara makroskopi kegagalan akibat fatigue selalu ditunjukkan dengan adanya deformasi plastis yang sedikit yang terlihat rata dan diikuti oleh patah statik. Secara makro kegagalan akibat fatigue sering ditandai dengan adanya beach mark atau garis pantai. Beach mark adalah garis yang menunjukkan hubungan siklus selama pembebanan.

Lokasi dan bentuk dari beach mark bervariasi terhadap kondisi pembebanan. Retak selalu dimulai dari daerah konsentrasi tegangan seperti fillet dan alur pasak pada poros. Dengan bergantung pada kondisi pembebanan, maka retak awal dapat berawal dari beberapa tempat.

Beberapa peneliti seperti Rehm dan Eligehausen (1999), dan Soehardjono (2006) telah mengindikasikan bahwa lebar retak pada pembebanan berulang untuk pelat bertulang pracetak dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti :

- a. rasio tegangan baja.
- b. selimut beton.
- c. rasio tulangan.
- d. frekuensi beban.
- e. kedalaman retak.
- f. lebar retak awal beban statik.

Lebar retak adalah salah satu dari persyaratan kemampuan layan yang diperlukan pada perencanaan keadaan batas. Pelat beton bertulang yang mangalami retak mikro akan mengalami perambatan retak yang cukup signifikan bila beban berulang diberikan walaupun pada kondisi beban kerja.