

TESIS

**PEMODELAN BALOK BETON BERTULANG DENGAN GFRP
BAR DAN GFRP SHEET MENGGUNAKAN METODE
ELEMEN HINGGA**

***MODELING OF REINFORCED CONCRETE BEAM WITH GFRP
BAR AND GFRP SHEET USING FINITE ELEMENT METHOD***

ERIKA AINUN ZAKINAH IKHSAN

D012 191 011



**PROGRAM MAGISTER DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2021**

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

PEMODELAN BALOK BETON BERTULANG DENGAN GFRP BAR DAN GFRP SHEET MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Disusun dan diajukan oleh

ERIKA AINUN ZAKINAH IKHSAN

D012191011

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi

Program Magister Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

pada tanggal 11 oktober 2021

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Prof. Dr. Ing. Herman Parung, M.Eng.
NIP. 1962 0729 1987 03 1001

Pembimbing Pendamping,



Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT.
NIP. 1972 0619 2000 12 2001

Ketua Program Studi S2
Teknik Sipil,



Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT.
NIP. 1972 0619 2000 12 2001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin,



Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, M.T.
NIP. 19601231 198609 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini ;

Nama : Erika Ainun Zakinah Ikhsan
NIM : D012191011
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S2

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Pemodelan Balok Beton Bertulang dengan *GFRP Bar* dan *GFRP Sheet* menggunakan Metode Elemen Hingga

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa Tesis yang saya tulis ini benar benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Tesis ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 11 Oktober 2021
Yang Menyatakan,



Erika Ainun Zakinah Ikhsan
NIM: D012 191 011

KATA PENGANTAR

Puji syukur senantiasa penulis panjatkan kepada Allah *Subhanahu Wata'ala* atas izin-Nya sehingga penulisan hasil penelitian tesis dengan judul "***Pemodelan Balok Beton Bertulang dengan GFRP Bar dan GFRP Sheet Menggunakan Metode Elemen Hingga***" dapat terselesaikan. Tak lupa pula penulis haturkan shalawat dan salam atas junjungan Nabi Muhammad *Shallallahu 'Alaihi Wasallam* sebagai suri tauladan bagi sekalian umat dalam segala aspek kehidupan, sehingga menjadi motivasi penulis dalam menuntut ilmu

Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang begitu besar kepada bapak **Prof. Dr. Ing. Herman Parung., M. Eng** dan ibu **Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty., ST., MT** selaku pembimbing utama dan pembimbing pendamping yang telah banyak memberikan waktu, gagasan dan pengetahuan serta dorongan semangat dan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan usulan penelitian tesis ini.

Terakhir, ucapan terima kasih kepada ibu dan ayah beserta saudara-saudara penulis atas bantuan, nasihat, dan motivasi yang diberikan selama penyusunan usulan penelitian tesis ini.

Hasil tesis ini masih jauh dari sempurna sehingga sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun untuk menyempurnakan usulan tesis ini. Penulis berharap semoga tesis ini dapat selesai dan bermanfaat utamanya bagi penulis sendiri dan bagi pengembangan ilmu pengetahuan pada umumnya.

ABSTRAK

ERIKA AINUN ZAKINAH IKHSAN. Pemodelan Balok Beton Bertulang dengan *GFRP Bar* dan *GFRP Sheet* Menggunakan Metode Elemen Hingga (dibimbing oleh **Herman Parung, Rita Irmawaty**)

Tujuan dari penelitian adalah untuk menganalisa kapasitas beban lentur, lendutan serta pola retak balok beton bertulang GFRP bar tanpa selimut beton pada daerah tarik dengan GFRP sheet sebagai tulangan geser menggunakan metode elemen hingga. Kemudian hasilnya di validasi oleh hasil pengujian eksperimen yang dilakukan oleh Kusnadi dkk, 2021 terkait perilaku lentur balok beton bertulang yang menggunakan tulangan GFRP.

Pemodelan dengan metode elemen hingga dilakukan menggunakan Abaqus terhadap 3 jenis balok yaitu balok kontrol (BK), balok menggunakan tulangan GFRP dengan selimut beton (BFS) dan balok dengan tulangan GFRP tanpa selimut dan penambahan GFRP sheet (BFTS). Pemodelan beton menggunakan *concrete damage plasticity* model, baja menggunakan elastic-plastic, GFRP bar hanya menggunakan elastic dan GFRP sheet menggunakan *hashin damage*.

Hasil analisa dengan uji eksperimental maupun pemodelan membuktikan bahwa penggunaan GFRP bar sebagai tulangan tarik tanpa selimut beton dan GFRP sheet sebagai tulangan geser pada BFTS dapat meningkatkan kapasitas beban lentur BFTS terhadap BK hingga 52,9% dan 15,731% terhadap BFS. Hasil uji keduanya menunjukkan deformasi dari yang kecil ke besar terturut-turut adalah BFTS, BFS dan BK. Tetapi pola retak yang terjadi pada BFTS pemodelan mengalami retak yang menyeluruh dan sebaliknya pada BFTS eksperimen. Keruntuhan geser terjadi sebagai akibat lemahnya pertahanan geser pada zona tekan.

Kata Kunci: Uji Lentur, *GFRP Bar*, *GFRP Sheet*

ABSTRACT

ERIKA AINUN ZAKINAH IKHSAN. Modeling of Reinforced Concrete Beam with GFRP Bar and GFRP Sheet Using Finite Element Method (supervised by Herman Parung, Rita Irmawaty)

The objectives of the study was to analyze the flexural load capacity, deflection and crack patterns of reinforced concrete beams with GFRP bars without a concrete cover in the tension area with GFRP sheet as shear reinforcement using the finite element method. Then the results were validated by the results of experimental tests conducted by Kusnadi et al, 2021 regarding the flexural behavior of reinforced concrete beams using GFRP reinforcement.

Modelling using the finite element method was carried out using Abaqus on 3 types of beams, namely control beams (BK), beams using GFRP reinforcement with a concrete cover (BFS) and beams with GFRP reinforcement without a concrete cover and the addition of GFRP sheet (BFTS). Concrete was modelled as concrete damage plasticity model, steel was a elastic-plastic, GFRP bar as elastic materials and GFRP sheet uses hashin damage model materials.

The results of the analysis using experimental and modelling tests prove that the use of GFRP bar as tensile reinforcement without concrete cover and GFRP sheet as shear reinforcement in BFTS increasing the flexural load capacity of BFTS to BK up to 52.9% and 15.731% to BFS. The result shows that deflection from the smallest to highest are BFTS, BFS and BK, respectively. However, the crack pattern that occurs in the modelling BFTS is completely cracked on the other hand on the BFTS experiment result. the shear failure occurred in the shear reinforcement as a result of the weak shear resistance in the compression zone.

Keywords: Flexural Experiment, GFRP Bar, GFRP Sheet

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
KATA PENGANTAR	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	ii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR NOTASI	xii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Maksud dan Tujuan.....	4
D. Batasan Masalah	5
E. Manfaat Kegiatan	5
F. Sistematika Penulisan.....	6
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	8
A. Penelitian Terdahulu	8
B. Tinjauan Umum.....	10
C. Karakteristik GFRP	11
D. Perilaku Lentur Balok	13
1. Tegangan dan regangan.....	13
2. Lendutan	16
3. Pola retak struktur	18
E. Prinsip Kegagalan Beton.....	20
F. <i>Software ABAQUS student edition</i>	22
BAB 3. METODE PENELITIAN	25
A. Lokasi Penelitian	25
B. <i>Software Analisis</i>	25
C. Metode Penelitian	25

1. Data balok	26
2. Unit satuan	29
D. Pemodelan Balok dengan Metode Elemen Hingga	29
1. <i>Create Part</i>	29
2. <i>Input Data</i>	32
2.1. Material Beton	32
2.1.1. <i>Concrete Damage Plasticity</i>	33
2.2. Material Baja	38
2.3. Material <i>GFRP Bar</i>	39
2.4. Material <i>GFRP Sheet</i>	40
2.4.1. <i>Hashin Damage GFRP Sheet</i>	40
3. <i>Assembly</i>	42
4. <i>Penyatuan Part</i>	43
4.1. <i>Constraint</i>	43
4.2. <i>Interaction</i>	44
5. <i>Boundary Condition</i>	48
6. <i>Mesh</i>	49
7. <i>Pembebanan</i>	51
8. <i>Submit Job</i>	53
E. <i>Diagram Alir Penelitian</i>	54
BAB 4. PEMBAHASAN	55
A. <i>Penentuan Ukuran Mesh</i>	55
B. <i>Hasil Analisis</i>	59
1. <i>Beban dan Lendutan</i>	59
1.1. <i>Balok Normal (BK)</i>	62
1.2. <i>Balok Fiber dengan Selimut (BFS)</i>	63
1.3. <i>Balok Fiber Tanpa Selimut (BFTS)</i>	65
2. <i>Pola Retak</i>	66
2.1. <i>Balok Normal (BK)</i>	66
2.2. <i>Balok Fiber dengan Selimut (BFS)</i>	67
2.3. <i>Balok Fiber Tanpa Selimut (BFTS)</i>	68

3. Beban dan Regangan Beton.....	69
3.1. Balok Normal (BK)	69
3.2. Balok Fiber dengan Selimut (BFS)	70
3.3. Balok Fiber Tanpa Selimut (BFTS).....	72
4. Beban dan Regangan Tulangan	73
4.1. Balok Normal (BK)	73
4.2. Balok Fiber dengan Selimut (BFS)	74
4.3. Balok Fiber Tanpa Selimut (BFTS).....	76
5. Analisis Perbandingan Kapasitas Beban Lentur	77
BAB 5. PENUTUP	80
A. Kesimpulan	80
B. Saran.....	81
DAFTAR PUSTAKA.....	82

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Kerusakan struktur beton akibat korosi pada tulangan memanjang dan geser	2
Gambar 2. Bagian-Bagian dari Balok	10
Gambar 3. <i>GFRP (Glass fiber reinforce polymer) bar</i>	12
Gambar 4. <i>GFRP (Glass fiber reinforce polymer) sheet</i>	12
Gambar 5. (a) Benda bebas dari segmen batang sebelum dibebani, (b) panjang segmen batang sebelum di bebani, (c) segmen batang sesudah dibebani, dan (d) tegangan	14
Gambar 6. Kurva hubungan Tegangan - Regangan beton	15
Gambar 7. (a) Balok sebelum pembebanan (b) Balok setelah pembebanan	17
Gambar 8. Lendutan pada balok	17
Gambar 9. Jenis retakan yang umumnya terjadi pada beton	20
Gambar 10. Perilaku Beton Terhadap Pembebanan	22
Gambar 11. Diagram aliran proses running pada <i>software</i> ABAQUS CAE	24
Gambar 12. Skema Pemodelan Balok Normal (BK).....	27
Gambar 13. Skema Pemodelan Balok Fiber dengan Selimut (BFS).....	28
Gambar 14. Skema Pemodelan Balok Fiber Tanpa Selimut (BFTS)	28
Gambar 15. (a) Concrete (b) Steel (c) GFRP bar (d) GFRP Sheet yang sudah dimodelkan.....	31
Gambar 16. <i>Create Part</i> pada modul <i>part</i> untuk (a) Concrete (b) Steel (c) GFRP bar (d) GFRP Sheet.....	31
Gambar 17. Input material behaviors concrete.....	33
Gambar 18. Kurva sudut dilatasi	34
Gambar 19. Kurva eksentrisitas	35
Gambar 20. Gaya tekan biaksial dan uniaksial	35
Gambar 21. Nilai Kc.....	36

Gambar 22. Kurva Hognestad, Parameter kuat tekan beton.....	37
Gambar 23. Parameter kuat tarik beton	37
Gambar 24. Input material behaviors steel.....	39
Gambar 25. Input material behaviors GFRP bar	39
Gambar 26. Input material behaviors GFRP sheet.....	42
Gambar 27. Penggabungan model (a) BK (b) BFS (c) BFTS.....	43
Gambar 28. Penyatuan tulangan dan beton dengan <i>embedded constraint</i>	44
Gambar 29. Pelekatan <i>GFRP sheet</i> pada beton dengan <i>surface to surface interaction</i>	44
Gambar 30. Grafik pemodelan pemisahan traksi (penarikan) untuk permukaan kohesif	46
Gambar 31. Nilai <i>contact property</i> untuk sifat tangensial	46
Gambar 32. Nilai <i>contact property</i> untuk sifat kohesif	48
Gambar 33. <i>Boundary condition</i> tumpuan sendi dan roll.....	48
Gambar 34. Perpindahan dan derajat kebebasan rotasi	49
Gambar 35. Ukuran mesh balok yang digunakan untuk penentuan ukuran mesh	51
Gambar 36. Input beban luar pada benda uji	52
Gambar 37. Pembebanan <i>dead load</i> menggunakan <i>gravity load</i>	53
Gambar 38. Iterasi pada Step Abaqus	53
Gambar 39. Perbandingan pola retak BK eksperimen dan pemodelan ...	55
Gambar 40. Perbandingan beban lendutan BK eksperimen dan pemodelan	56
Gambar 41. Perbandingan beban regangan beton BK eksperimen dan pemodelan	57
Gambar 42. Perbandingan beban regangan tulangan BK eksperimen dan pemodelan	58
Gambar 43. Hubungan beban-defleksi pada balok.....	60
Gambar 44. Hubungan beban-defleksi BK pemodelan.....	60

Gambar 45. Hasil lendutan BK pemodelan dengan metode elemen hingga	62
Gambar 46. Beban lendutan BK eksperimen dan pemodelan	63
Gambar 47. Hasil lendutan BFS pemodelan dengan metode elemen hingga	63
Gambar 48. Beban lendutan BFS eksperimen dan pemodelan	64
Gambar 49. Hasil lendutan BFTS pemodelan dengan metode elemen hingga	65
Gambar 50. Beban lendutan BFTS eksperimen dan pemodelan	65
Gambar 51. Pola retak BK eksperimen dan pemodelan	66
Gambar 52. Pola retak BFS eksperimen dan pemodelan	67
Gambar 53. Pola retak BFTS eksperimen dan pemodelan	68
Gambar 54. Regangan beton BK pemodelan.....	69
Gambar 55. Beban regangan beton BK eksperimen dan pemodelan	70
Gambar 56. Regangan beton BFS pemodelan	70
Gambar 57. Beban regangan beton BFS eksperimen dan pemodelan	71
Gambar 58. Regangan beton BFTS pemodelan	72
Gambar 59. Beban regangan beton BFTS eksperimen dan pemodelan..	72
Gambar 60. Regangan tulangan BK pemodelan.....	73
Gambar 61. Beban regangan tulangan BK eksperimen dan pemodelan .	74
Gambar 62. Regangan tulangan BFS pemodelan.....	75
Gambar 63. Beban regangan tulangan BFS eksperimen dan pemodelan	75
Gambar 64. Regangan tulangan BFTS pemodelan	76
Gambar 65. Beban regangan tulangan BFTS eksperimen dan pemodelan	76
Gambar 66. Kapasitas beban lentur balok eksperimen dan pemodelan	78

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Karakteristik mekanis tulangan	26
Tabel 2. Karakteristik mekanis beton.....	27
Tabel 3. Dimensi dan jarak desain balok.....	27
Tabel 4. Konsistensi satuan dalam Abaqus.....	29
Tabel 5. Parameter plasticity untuk concrete damage plasticity	36
Tabel 6. Sifat elastik ortotropik dari epoksi yang diperkuat serat	41
Tabel 7. Sifat inisial kerusakan ortotropik dari epoksi yang diperkuat serat	41
Tabel 8. Nilai koefisien kohesi dan gesek.....	45
Tabel 9. Hasil BK eksperimen dan pemodelan mesh 30, 40, dan 50	58
Tabel 10. Hasil nilai uji eksperimen dan pemodelan	78

DAFTAR NOTASI

f	= Tegangan, N/mm ²
P	= Gaya, N
A	= Luas permukaan, mm ²
f_D	= Tegangan geser, N/mm ²
V	= Gaya geser, N
A	= Luas daerah, mm ²
$f_{x,y}$	= Tegangan lentur, N/mm ²
M	= Momen lentur, Nmm
x,y	= Jarak dari sumbu netral, mm
I	= Momen inersia penampang, mm ⁴
f_b	= Tegangan lentur (maksimum di tepi atas dan atau bawah)
M	= Momen maksimum yang dialami
c	= Jarak dari sumbu netral ke tepi terluar
I	= Momen inersia penampang melintang terhadap sumbu netral
S	= Modulus penampang ($S = I/c$) terhadap sumbu netral lentur
ϕ_b	= 0,90
M_u	= Momen lentur akibat beban terfaktor
M_n	= Tahanan momen nominal
dc	= Compression damage parameter
σ_c	= Tegangan tekan beton, MPa
E_c	= Modulus elastisitas beton, MPa
ϵ_{pl}	= Regangan tekan plastis beton
bc	= Faktor konstan pendekatan monotonic tekan
dt	= Tension damage parameter
σ_t	= Tegangan tarik beton, MPa
E_c	= Modulus elastisitas beton, MPa
ϵ_{pl}	= Regangan tarik plastis beton, t
bt	= Faktor konstan pendekatan monotonic Tarik

- $\sigma_L^{f,t}$ = Tegangan keruntuhan longitudinal tarik
- $\sigma_L^{f,c}$ = Tegangan keruntuhan longitudinal tekan
- $\sigma_T^{f,t}$ = Tegangan keruntuhan transversal tarik
- $\sigma_T^{f,c}$ = Tegangan keruntuhan transversal tekan
- τ_{LT}^f = Kuat geser dalam bidang longitudinal dan transversal

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kelemahan struktur beton bertulangan terutama pada struktur di laut dimana sejumlah besar garam berada di laut dapat berkontribusi untuk mempercepat proses korosi yang menyebabkan berkurangnya kapasitas kekuatan beton bertulang itu sendiri. Hal tersebut menyebabkan kebutuhan untuk mengganti atau melakukan perbaikan struktur, dimana biayanya cukup mahal. Penggunaan beton bertulang dengan bahan komposit fiber-reinforced polimer (FRP) telah menjadi salah satu solusi untuk mengatasi masalah umum yang disebabkan oleh korosi pada tulangan baja.

Penggunaan tulangan tahan korosi pada elemen struktur untuk kondisi lingkungan sangat agresif lebih menguntungkan dibandingkan dengan penggunaan tulangan baja yang diberi perlindungan karat dengan metode cathodic protection, epoxy coating atau galvanisasi (Amir dkk, 2020). Selain tahan korosi, GFRP bar memiliki kekuatan yang tinggi, tidak terpengaruh magnet, memiliki ketahanan fatik yang baik, ringan, rendah daya hantar panas dan listriknya (ACI Committee 440,2006). Penggunaan massive *Fiber Reinforced Polymers* (FRPs) dimulai setelah Perang Dunia II karena peningkatan permintaan akan material ringan dan berkekuatan tinggi. Aplikasi pertama berada di industri dirgantara dan pertahanan. Selama tahun 1990-an, penelitian besar-besaran mengenai penerapan FRP di

industri konstruksi dilakukan karena tingginya biaya pemeliharaan baja yang terkorosi dalam struktur beton bertulang. (Jabbar and Farid, 2018) mengungkapkan bahwa penggunaan GFRP bar untuk penulangan pondasi lebih menguntungkan karena memiliki kuat tarik dan daya tahan terhadap korosi yang lebih tinggi dibandingkan tulangan besi untuk diameter yang sama. Oleh karena itu, mengganti tulangan baja dengan tulangan FRP non korosif menghilangkan potensi korosi dan kerusakan terkait, investasi umur struktur. Sementara untuk perbaikan akibat kerusakan tulangan geser dapat dilakukan dengan menambahkan *GFRP sheet* sesuai dengan kebutuhan. Bahan serat kaca memiliki kapasitas energi regangan yang lebih elastik dan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi dibandingkan dengan baja, sebagai akibatnya, penggunaan baja dalam beton akan berkurang. GFRP bar lebih sesuai untuk merancang elemen struktural, menuntut rasio kekuatan dan berat yang tinggi dan juga ketahanan terhadap korosi yang tinggi.



Gambar 1. Kerusakan struktur beton akibat korosi pada tulangan memanjang dan geser

Teknologi industri saat ini yang semakin maju dan berkembang sangat pesat menuntut penyedia barang maupun jasa membuat suatu sistem yang lebih efektif dan efisien. Salah satu solusi bagi industri konstruksi adalah permodelan struktur. Dimana untuk menganalisa suatu konstruksi yang akan dibangun, dapat dilakukan dengan memodelkan konstruksi tersebut ke dalam model yang lebih sederhana. Model memegang peranan penting di bidang ilmu pengetahuan. Keuntungan dari penggunaan permodelan adalah waktu, biaya dan tenaga. Pemodelan bisa juga dilakukan untuk menghindari resiko kerusakan sistem nyata. Sebuah model diperlukan bilamana percobaan dengan sistem nyata menjadi terhalang karena mahal, berbahaya ataupun merupakan sesuatu yang tidak mungkin untuk dilakukan. Phillips (1976) mengungkapkan bahwa yang dimaksudkan dengan model adalah representasi sederhana dari sesuatu yang nyata. Dengan demikian industri konstruksi saat ini perlu membuat sebuah model yang mewakili sistem nyata serta mempelajarinya sebagai pengganti sistem nyata.

Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa balok dengan perkuatan GFRP mampu meningkatkan kapasitas lentur dari balok sebesar 4.14 % terhadap balok normal (Hijriah dkk, 2020). Sedangkan hasil eksperimen lain menunjukkan bahwa pemasangan GFRP sheet pada balok dapat meningkatkan kapasitas lentur dan daktilitas balok. Masing-masing sebesar 37,96% dan 25% (Kusnadi dkk, 2020). Balok yang akan di analisis terdiri dari tiga jenis balok yaitu, balok normal atau balok konvensional (BK),

balok menggunakan tulangan tarik GFRP bar dengan selimut (BFS) dan balok menggunakan GFRP bar sebagai tulangan tarik dan GFRP sheet sebagai tulangan geser tanpa selimut (BFTS). Maka perlu diadakan penelitian dengan judul “Pemodelan Balok Beton Bertulang dengan *GFRP Bar dan GFRP Sheet* Menggunakan Metode Elemen Hingga”. Dimana hasil dari penelitian ini akan divalidasi oleh hasil dari uji eksperimental. Apakah hasil analisis numerik sesuai dengan hasil uji eksperimental studi.

B. Rumusan Masalah

Permasalahan yang dapat dirumuskan untuk analisis adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kapasitas beban lentur, lendutan serta pola retak balok beton bertulang *GFRP bar* tanpa selimut beton pada daerah tarik dengan *GFRP sheet* sebagai tulangan geser menggunakan metode elemen hingga.
2. Bagaimana validasi hasil pemodelan menggunakan metode elemen hingga dengan hasil uji eksperimental untuk kapasitas beban lentur, lendutan serta pola retak balok beton bertulang *GFRP bar* tanpa selimut beton pada daerah tarik dengan *GFRP sheet* sebagai tulangan geser.

C. Maksud dan Tujuan

Maksud dan tujuan penulisan skripsi ini sebagai berikut:

1. Menganalisa kapasitas beban lentur, lendutan serta pola retak balok beton bertulang *GFRP bar* tanpa selimut beton pada daerah tarik

dengan *GFRP sheet* sebagai tulangan geser menggunakan metode elemen hingga.

2. Memvalidasi hasil pemodelan menggunakan metode elemen hingga dengan hasil uji eksperimental untuk kapasitas beban lentur, lendutan serta pola retak balok beton bertulang *GFRP bar* tanpa selimut beton pada daerah tarik dengan *GFRP sheet* sebagai tulangan geser.

D. Batasan Masalah

Adapun batasan - batasan masalah adalah sebagai berikut:

1. Struktur yang di analisis adalah bagian balok dimana tulangnya di ganti dengan jenis tulangan polimer berserat kaca atau *glass fiber reinforced polymer* (GFRP).
2. Perilaku Lentur yang dianalisis adalah beban lentur, lendutan, pola retak, regangan beton dan tulangan.
3. Pemodelan balok-balok dilakukan dengan menggunakan software ABAQUS Student Edition 6.14.
4. Skema pembebanan sesuai dengan pembebanan eksperimental.
5. Dimensi untuk semua balok 150 x 250 x 3300 mm.

E. Manfaat Kegiatan

Manfaat yang diharapkan dari analisis ini adalah sebagai bahan referensi dalam perencanaan maupun perbaikan struktur khususnya pada struktur di

lingkungan laut dengan mempertimbangkan kekurangan dan kelebihan penggunaan GFRP bar dan GFRP sheet.

F. Sistematika Penulisan

Agar penelitian ini lebih terarah maka disusun sistematika penulisan tesis yang akan dilakukan dengan sesuai tahapan - tahapan yang disyaratkan sehingga hasil penelitian lebih sistematis. Berikut merupakan susunan penelitian ini:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini memberikan gambaran tentang latar belakang dan kebutuhan dari masalah untuk diangkat menjadi sebuah tulisan. Pokok bahasan dalam bab ini adalah latar belakang masalah, rumusan masalah, maksud dan tujuan dari penelitian ini, manfaat dari penelitian ini dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini, memberikan gambaran informasi yang terkait tentang penelitian balok, GFRP bar, GFRP sheet serta software abaqus serta informasi-informasi lainnya sebagai bahan acuan dalam melengkapi penelitian ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini, menjelaskan metode yang digunakan dalam menganalisa balok yang menggunakan GFRP bar dan GFRP sheet dan balok kontrol.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini menjabarkan tentang hasil-hasil analisa numerikal balok yang menggunakan GFRP bar dan GFRP sheet dan balok kontrol.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi tentang rangkuman penelitian secara keseluruhan beserta saran berdasarkan penelitian yang telah dilakukan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merupakan penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya yang mungkin memiliki keterkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan oleh peneliti. Penelitian terdahulu juga menjadi salah satu bahan pertimbangan sehingga dapat memberi referensi dalam menuli ataupun mengkaji penelitian yang akan dilakukan. Berikut adalah penelitian yang menjadi acuan dan referensi peneliti dalam melakukan penelitian :

1. Kusnadi (Disertasi, 2021) dari Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin tentang “Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang *GFRP Bar* tanpa Selimut Beton pada Daerah Tarik dengan *GFRP Sheet* sebagai Tulangan Geser”. Dalam penelitian tersebut bertujuan untuk Mengevaluasi kapasitas lentur, kekakuan dan daktilitas balok beton bertulang *GFRP bar* tanpa selimut beton pada daerah tarik dengan *GFRP sheet* sebagai tulangan geser serta menganalisis pola retak dan kegagalan balok beton bertulang *GFRP bar* tanpa selimut pada daerah tarik dengan *GFRP sheet* sebagai tulangan geser. Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang dilakukan di laboratorium dimana dilakukan pengujian terhadap tiga jenis benda uji (Balok) yaitu Balok Normal atau Balok Konvensional (BK), Balok dengan Tulangan Tarik GFRP Bar dengan

Selimut Beton (BFS) dan Balok dengan Tulangan Tarik GFRP Bar, Tulangan Geser GFRP Sheet tanpa Selimut Beton (BFTS). Hasil dari penelitian ini menunjukkan Kapasitas beban lentur balok BFTS lebih besar 52.9% dibandingkan dengan balok BK dan lebih besar 13.4 % dibandingkan balok BFS sedangkan keruntuhan geser yang terjadi pada balok beton bertulang *GFRP bar* tanpa selimut beton yang menggunakan *GFRP sheet* sebagai tulangan geser sebagai akibat lemahnya pertahanan geser pada zona tekan.

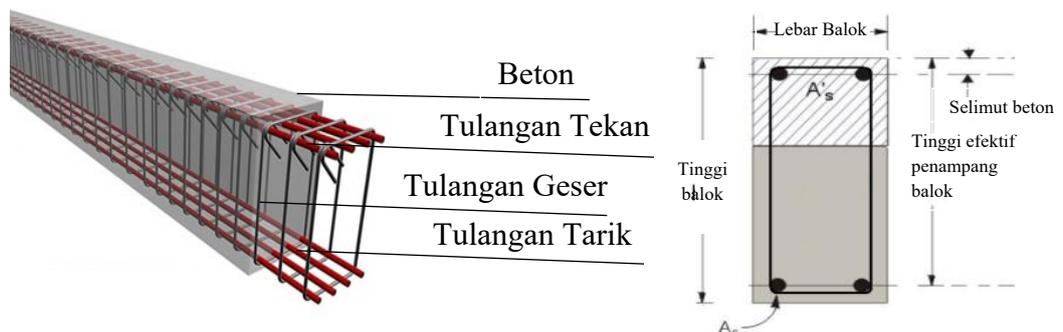
2. E Alizadeh, M Dehestani, B Navayi Neya dan Mahdi Nematzadeh (Paper, 2017) dari Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Teknologi Babol Noshirvani dan Mazandaran tentang "*Efficient composite bridge deck consisting of GFRP, steel, and concrete*". Spesimen dalam penelitian tersebut adalah dek jembatan komposit hemat biaya yang terdiri dari beberapa sel kotak baja, pelat beton, dan lapisan polimer yang diperkuat serat kaca (*Fiber Reinforced Polymer*). Dimana pengujian struktur dek dengan pembebanan statis dilakukan secara eksperimental. Kemudian hasilnya divalidasi dengan program elemen hingga ABAQUS CAE. Hasil akhir menunjukkan bahwa kegagalan ultimit dari dek komposit diawali dengan retakan longitudinal pada permukaan atas pelat beton. Tidak ada debonding yang terjadi pada antarmuka antara pelat beton dan kotak baja yang menunjukkan bahwa rusuk perfbond dapat digunakan secara efektif untuk sambungan geser. Hasil analisis

eksperimental dan numerik menunjukkan bahwa dek jembatan memiliki kekuatan yang diinginkan dan memenuhi persyaratan kekakuan.

B. Tinjauan Umum

Dalam meneliti balok dengan perkuatan *fiber glass* ada beberapa teori yang perlu ditinjau yang nantinya akan digunakan sebagai landasan dalam penelitian. Adapun teori tersebut antara lain: balok, GFRP (*glass fiber reinforcement polymer*) bar, tulangan baja, GFRP (*glass fiber reinforcement polymer*) sheet, regangan, lendutan, retak struktur, *software ABAQUS*. Balok yang akan dianalisis merupakan;

1. Balok normal atau balok konvensional, beton bertulang yang menggunakan besi sebagai tulangan longitudinal dan tulangan geser.
2. Balok dengan selimut, beton bertulang yang tulangan longitudinalnya menggunakan GFRP bar sedangkan tulangan gesernya menggunakan besi
3. Balok tanpa selimut, beton bertulang tanpa selimut beton yang tulangan longitudinalnya menggunakan GFRP bar sedangkan beban geser ditumpu oleh GFRP Sheet.



Gambar 2. Bagian-Bagian dari Balok

Perilaku balok tanpa tulangan geser untuk balok yang mempunyai tulangan memanjang, yaitu tulangan yang direncanakan untuk memikul gaya-gaya lentur tarik dan tekan yang ditimbulkan oleh momen lentur, tegangan geser yang tinggi menimbulkan retak miring. Untuk mencegah pembentukan retak miring, maka digunakan penulangan transversal (dikenal dengan penulangan geser). Tulangan geser meningkatkan kekuatan balok karena memikul sebagian gaya geser penampang, menahan perkembangan lebar retak akibat tarik diagonal sehingga mempertahankan adanya interface shear transfer serta tulangan geser yang cukup rapat akan mengikat tulangan memanjang sehingga meningkatkan dowelcapacity.

C. Karakteristik GFRP

Yang umum dikenal ada tiga Fiber Reinforced Polymer (FRP), yaitu GFRP (glass fiber reinforced polymer), AFRP (aramid fiber reinforced polymer) dan CFRP (carbon fiber reinforced polymer). Dimana tiap jenisnya berbahan komposit yang tertanam dalam matriks polimer (resin) untuk membentuk berbagai jenis produk seperti batangan, bagian struktural, pelat dan lembar (Baggio dkk, 2014).

Dimana GFRP bar yang paling murah di antara jenis FRP lainnya, memiliki banyak sifat yang terdefinisi dengan baik, antara lain; rasio kekuatan terhadap berat (10 hingga 15 kali dari baja), kekuatan tarik tinggi, tahan terhadap Ion Klorida dan zat kimiawi pH rendah, tahan terhadap benturan, transparan terhadap medan magnet dan frekuensi radio-

magnetisasi dan non-konduktif termal dan elektrik (Arivalagan S. dkk, 2012).



Gambar 3. *GFRP (Glass fiber reinforce polymer) bar*

Namun, modulus elastisitas GFRP bar (40-55 GPa) lebih rendah daripada batang baja yang mengarah ke lendutan yang lebih besar dan retak yang lebih lebar daripada beton bertulang baja, inilah sebabnya mengapa GFRP bar biasanya tidak digunakan sebagai tulangan tekan (Saraswathy T. & Dhanalakshmi K., 2014). GFRP bar adalah bahan anisotropik dengan sumbu longitudinal yang kuat yang diatur oleh serat dan sumbu transversal yang lemah atau sedang yang diatur oleh resin yang mengikat serat (Benmokrane B. Dkk, 2006).



Gambar 4. *GFRP (Glass fiber reinforce polymer) sheet*

Pemasangan GFRP sheet selain sebagai perkuatan geser juga diharapkan memberikan efek kekangan pada beton sehingga meningkatkan lekatan tulangan dengan beton (Kusnadi dkk, 2020). Properti GFRP sheet memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang sangat tinggi, karena bahannya ringan. Keuntungan dari berat lembaran GFRP yang rendah dapat menguntungkan pada pemasangan lebih cepat, rangka struktural yang lebih sedikit, dan biaya pengiriman lebih rendah. Kelebihan lainnya dapat dibentuk menjadi berbagai bentuk kompleks sehingga Hampir semua bentuk atau tekstur dapat diproduksi. Serta perawatan rendah, penelitian menunjukkan tidak ada kehilangan sifat laminasi di GFRP setelah 30 tahun, dengan perawatan minimum.

D. Perilaku Lentur Balok

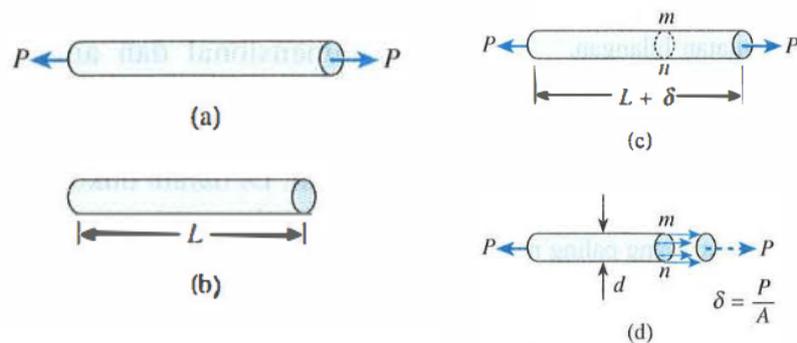
1. Tegangan dan regangan

Apabila balok bertulang diberi gaya P (searah dengan gaya gravitasi), maka tegangan maksimum yang terjadi pada beton adalah tegangan tekan (*compressive stress*) sedangkan pada tulangan akan mengalami tegangan tarik (*tensile stress*) Karena tegangan ini mempunyai arah yang tegak lurus permukaan potongan, maka tegangan ini disebut tegangan normal (*normal stress*). Jadi, tegangan normal dapat berupa tarik atau tekan .

$$f = \frac{P}{A} \quad (1)$$

dimana, f = Tegangan (N/mm^2) ; P = Gaya (N) ; A = Luas Permukaan (mm^2)

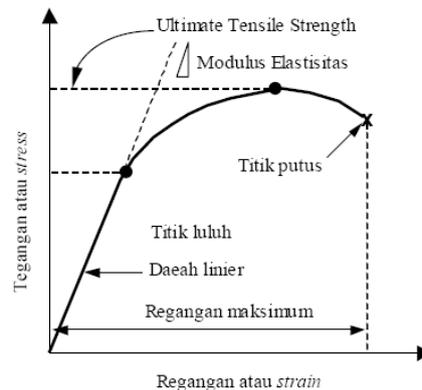
Persamaan ini menunjukkan intensitas tegangan merata pada suatu batang yang dibebani secara aksial dengan penampang sembarang.



Gambar 5. (a) Benda bebas dari segmen batang sebelum dibebani, (b) panjang segmen batang sebelum di bebani, (c) segmen batang sesudah dibebani, dan (d) tegangan

Sumber: Gere, J. M. & Stephen P. Timoshenko (2000, p.4)

Gambar di atas menunjukkan bahwa suatu batang lurus akan mengalami perubahan panjang apabila diberi gaya secara aksial, yaitu menjadi panjang jika mengalami tarik dan menjadi pendek jika mengalami tekan. Sebagai contoh, tinjau kembali batang pada gambar 5. Perpanjangan δ dari batang ini (Gambar 5c) adalah hasil kumulatif dari perpanjangan semua elemen bahan di seluruh volume batang. Dapat dilihat dari kurva tegangan regangan pada gambar 6:



Gambar 6. Kurva hubungan Tegangan – Regangan beton
Sumber: William D. Callister Jr. John Wiley&Sons (2004)

Tegangan geser pada penampang dapat diperoleh dengan membagi gaya geser total V dengan luas A dari penampang melintang dimana gaya bekerja, sebagai berikut:

$$fD = \frac{V}{A} \quad (2)$$

dengan:

fD = Tegangan geser (N/mm^2)

V = Gaya geser (N)

A = Luas daerah (mm^2)

Ketika suatu elemen mengalami lentur yang merupakan reaksi dari adanya beban transversal, aksi lentur tersebut akan menyebabkan serat-serat pada satu permukaan yang mengalami tarik dan serat pada permukaan lainnya mengalami tekan. Hal ini menyebabkan adanya tegangan lentur pada elemen tersebut. tegangan lentur dapat didefinisikan menggunakan persamaan:

$$f_x = -\frac{M.y}{I} \quad (3)$$

$$f_y = -\frac{M \cdot x}{I} \quad (4)$$

Dengan:

$f_{x,y}$ = Tegangan lentur (N/mm²)

M = Momen lentur (Nmm)

x,y = Jarak dari sumbu netral (mm)

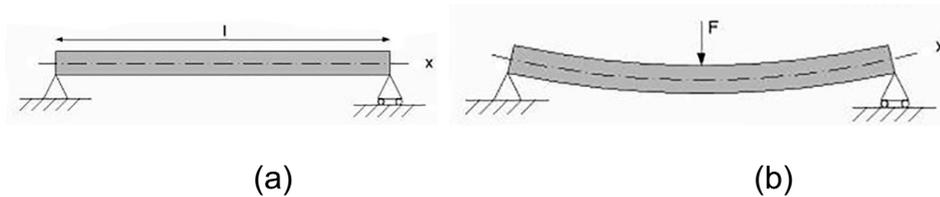
I = Momen inersia penampang (mm⁴)

Setelah tegangan maksimum dilewati, beton mengalami retak yang besarnya tergantung dari batas ketahanan regangan beton itu sendiri. Tegangan tekan maksimum yang dicapai oleh beton yang mengalami lenturan murni f_c ” boleh menyimpang dari hasil testing kekuatan beton yang berbentuk silinder (f_c') karena perbedaan ukurannya. Ketika beban diberikan pada suatu batang yang mempunyai regangan yang tetap, kedua dari modulus elastisitas dan kekuatan beton bertambah. Pada pemberian gaya tekan yang besar secara berulang, menghasilkan suatu histerisis efek dari kurva tegangan – regangan (stress-strain).

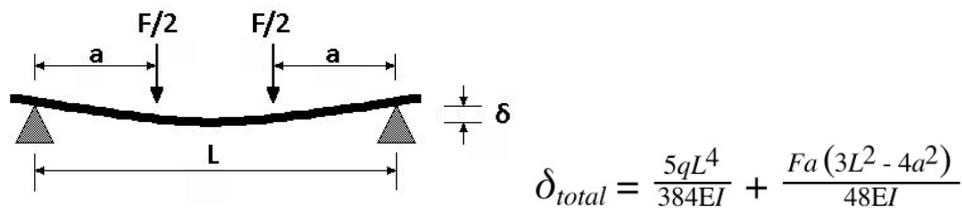
2. Lendutan

Lendutan atau perubahan bentuk pada balok dalam arah x maupun arah y akibat adanya pembebanan. Jika membahas lendutan pada balok, lendutan yang terjadi adalah lendutan pada sumbu y dimana searah dengan arah pembebanan. Deformasi pada balok sangat mudah untuk dilihat dari perbandingan posisinya sebelum mengalami pembebanan dan

setelah pembenanan. Lendutan diukur dari permukaan netral awal ke posisi netral setelah terjadi deformasi.



Gambar 7. (a) Balok sebelum pembebanan (b) Balok setelah pembebanan



Gambar 8. Lendutan pada balok
Sumber : Doni Hidayat dan Gawit Hidayat, 2015

Konfigurasi yang diasumsikan dengan deformasi permukaan netral dikenal sebagai kurva elastis dari balok. Gambar 7 (a) memperlihatkan balok pada posisi awal sebelum terjadi deformasi dan gambar 7 (b) adalah balok dalam konfigurasi terdeformasi yang diasumsikan akibat aksi pembebanan.

Hal-hal yang mempengaruhi terjadinya lendutan yaitu :

1. Kekakuan Batang dimana semakin kaku suatu batang maka lendutan batang yang akan terjadi pada batang akan semakin kecil.
2. Besarnya kecil gaya yang diberikan pada batang berbanding lurus dengan besarnya lendutan yang terjadi. Dengan kata lain semakin

besar beban yang dialami batang maka lendutan yang terjadipun semakin kecil.

3. Jenis tumpuan yang diberikan dimana jumlah reaksi dan arah pada tiap jenis tumpuan berbeda-beda. Jika karena itu besarnya lendutan pada penggunaan tumpuan yang berbeda-beda tidaklah sama. Semakin banyak reaksi dari tumpuan yang melawan gaya dari beban maka lendutan yang terjadi pada tumpuan rol lebih besar dari tumpuan pin (pasak) dan lendutan yang terjadi pada tumpuan pin lebih besar dari tumpuan jepit.
4. Jenis beban yang terjadi pada batang dimana beban terdistribusi merata dengan beban titik, keduanya memiliki kurva lendutan berbeda-beda. Pada beban terdistribusi merata slope yang terjadi pada bagian batang yang paling dekat lebih besar dari slope titik. Ini karena sepanjang batang mengalami beban sedangkan pada beban titik hanya terjadi pada beban titik tertentu saja.

3. Pola retak struktur

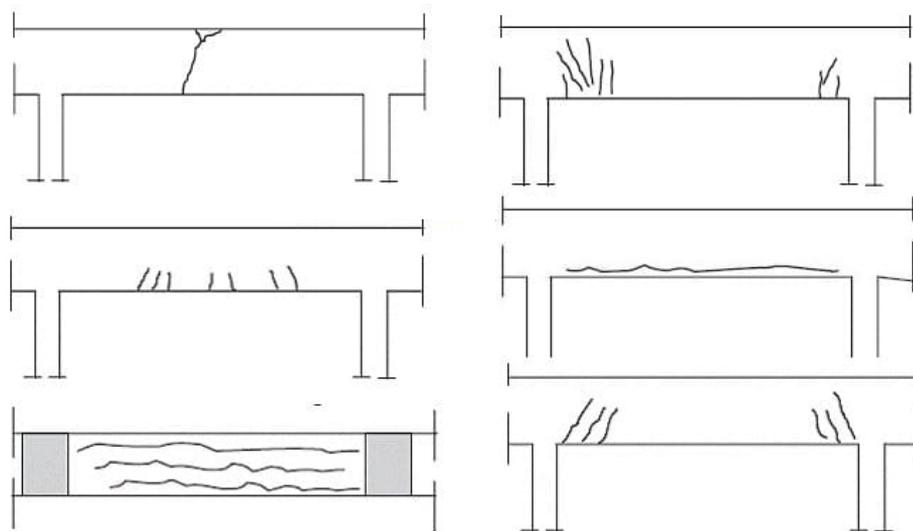
Ada dua jenis keretakan pada balok yang ditumpu sederhana yaitu retak yang arahnya vertikal dan diagonal. Retak diagonal karena terjadi keruntuhan geser dan retak dengan arah vertikal disebabkan oleh keruntuhan lentur. Dimana retak dapat diakibatkan oleh penurunan, susut, beban bertukar arah, perbedaan unsur kimia dan perbedaan suhu. Keretakan beton sering kali terjadi pada awal pembebanan hal itu disebabkan karena material dari beton sendiri merupakan material yang

lemah terhadap tarik. Keretakan secara vertikal seringkali dimulai dari perbedaan penurunan yang tidak merata. Meskipun beton bertulang mampu menahan gaya geser, tetapi jika beban gesernya terlalu besar akan menyebabkan keruntuhan geser. Hal ini dapat diatasi dengan penambahan tulangan geser pada balok. Beton akan mengalami retak dengan arah tegak lurus tegangan utama. Dengan demikian semakin sedikit beton yang harus memikul keadaan tegangan yang tidak menentu.

Keretakan pada balok bisa berkembang sebagai hasil variasi lebar dari situasi. Retak dimulai dari retak permukaan yang tidak dapat terlihat secara kasat mata. Berbanding lurus dengan beban, semakin besar beban yang diberikan maka retak akan melebar dan menjalar, serta akan menimbulkan retak pada daerah lainnya. Apabila pembebanan diberikan secara terus menerus dapat mengakibatkan retak rambut yang merambat hingga pada akhirnya terjadi kegagalan atau keruntuhan pada struktur (Restian, 2008). Secara garis besar, terdapat tiga jenis keretakan pada balok, yaitu:

1. Retak lentur (flexural crack) : Retakan ini terjadi hampir tegak lurus dengan daerah yang memiliki momen lentur yang besar.
2. Retak geser lentur (flexural shear crack) : Terjadi pada bagian balok yang sebelumnya telah terjadi keretakan lentur. Bisa dikatakan bahwa retak geser lentur adalah perambatan diagonal dari retak lentur yang terjadi sebelumnya.

3. Retak Tarik diagonal (web shear crack) : Retak Tarik diagonal terjadi pada garis netral. Hal ini terjadi saat gaya geser maksimum dan tegangan aksial yang terjadi sangat kecil.



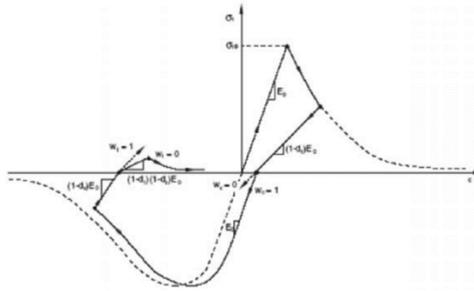
Gambar 9. Jenis retakan yang umumnya terjadi pada beton

E. Prinsip Kegagalan Beton

Keruntuhan dari balok sendiri itu tergantung dari seberapa kuat balok yang di desain dan seberapa besar beban yang diberikan. Kapasitas tekan balok ditentukan oleh desain mutu beton sedangkan kapasitas tarik ditentukan oleh tegangan leleh tulangan. Dalam merencanakan balok pada kondisi pembebanan tertentu harus disusun komposisi dimensi balok beton dan jumlah serta besar tulangan sedemikian rupa sehingga dapat menimbulkan momen tahanan dalam paling tidak, sama dengan momen lentur maksimum yang ditimbulkan oleh beban. Apabila kapasitas batas kekuatan beton terlampaui dan tulangan baja mencapai luluh, balok akan hancur.

Pada Abaqus ada beberapa parameter yang menentukan agar model bersifat *concrete damaged plasticity* yaitu: *Plasticity, Compressive Behavior, Tensile Behavior, Concrete Compressive Damage, Concrete Tension Damage*.

Hal yang paling membedakan antara damage plasticity dan smeared cracking adalah kemampuannya untuk mendefinisikan degradasi tekan dan tarik. Prinsip dari damage plasticity dijelaskan pada gambar 11, kurva menunjukkan perilaku beton terhadap pembebanan. Elemen mengalami tegangan tarik melebihi kekuatannya. Retak menyebabkan kerusakan sebagian dari material yang dapat didefinisikan oleh parameter dt dan ketika beban pada elemen dilepaskan maka modulus elastisnya berubah menjadi $(1-dt)E_0$. Jika setelah itu elemen ditekan, perilaku elastisnya ditunjukkan oleh wc dan modulus elastis saat tekan ditunjukkan oleh $(1-dt+wc)E_0$. Dengan asumsi bahwa retak tidak memberikan pengaruh pada kekakuan tekan, parameter wc didefinisikan dengan nilai satu. Ketika nilai dari parameter wc sama dengan nol (full degradation), kekakuan tekannya dapat diidentikkan sebagai kekakuan tarik. Dengan cara yang sama kegagalan tekan dapat dideskripsikan. Penampang yang tertekan kehilangan sifat awalnya pada saat mengalami tekan, ditunjukkan oleh parameter dc dan sifat awal material saat tarik ditunjukkan oleh parameter wt .



Gambar 10. Perilaku Beton Terhadap Pembebanan
(sumber: Abaqus, Lee Feves, 1998)

F. Software ABAQUS student edition

ABAQUS adalah program simulasi rekayasa yang kuat, didasarkan pada metode elemen hingga, yang dapat memecahkan masalah mulai dari analisis linier relatif sederhana sampai simulasi nonlinier yang paling menantang. ABAQUS berisi perpustakaan yang luas dari unsur-unsur yang dapat memodelkan hampir semua geometri apapun. Program ini memiliki daftar yang sangat luas dari model material yang dapat mensimulasikan perilaku sebagian besar bahan rekayasa, termasuk logam, karet, polimer, komposit, beton bertulang, busa yang lentur dan kuat, dan bahan geoteknik seperti tanah dan batuan.

Dalam perilaku mekanis ini, model diasumsikan kontinum, plastisitas berdasarkan, model kerusakan untuk beton. Dalam prosedur ini, diasumsikan bahwa dua mekanisme kegagalan utama adalah retak retakan dan penghancuran tekan dari bahan beton.

Penguatan struktur beton di ABAQUS biasanya disediakan dengan cara memasang tulangan. Ini adalah batang satu dimensi yang dapat didefinisikan secara tunggal atau tertanam dalam permukaan yang

berorientasi. Perilaku beton dianggap independen dari tulangan. Efek dari slip obligasi dan tindakan dowel dimodelkan kira-kira dengan memperkenalkan beberapa "ketegangan kaku" ke dalam pemodelan beton. Hal ini diperlukan untuk mensimulasikan transfer beban di celah melalui tulangan.

Analisis ABAQUS secara lengkap terdiri dari tiga tahap, yaitu: *preprocessing*, simulasi, dan *postprocessing*.

1) Proses Awal (*Preprocessing*).

Bagian ini merupakan langkah awal untuk menentukan model yang akan dilakukan analisis. Pemodelan part dilakukan dalam software ABAQUS dengan memasukkan geometri yang telah kita ketahui sebelumnya. Dalam menggambarkan model, dapat menggunakan koordinat sistem yang akan dibuat. Sebelum dilakukan simulasi, terlebih dahulu harus memeriksa semua keyword dan parameter yang digunakan agar tidak terjadi kesalahan. Selain itu, urutan dalam memasukkan data harus diperhatikan dengan benar serta tidak lupa memastikan satuan yang digunakan dalam input data.

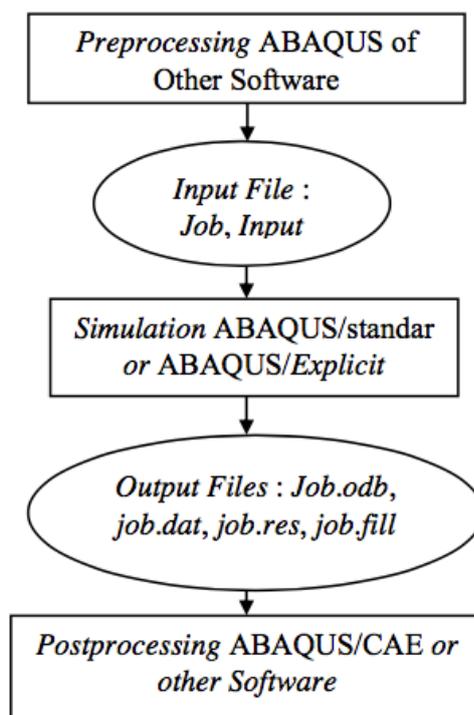
2) Simulasi (*Simulation*)

Simulasi yang biasanya dijalankan sebagai pengantar proses merupakan tahap dimana program ABAQUS memulai proses untuk melakukan pemecahan masalah numerik yang diidentifikasi dalam model.

3) Proses Akhir (Postprocessing)

Pada proses ini dapat dilakukan evaluasi hasil dari simulasi yang telah lengkap (completed), regangan, tegangan atau variable lain yang telah selesai dihitung. Evaluasi bisaanya dilakukan secara interaktif menggunakan visualisasi model dari ABAQUS CAE atau post processor yang lain. Modul visualisasi, membaca binary file output database, mempunyai bermacam-macam pilihan untuk ditampilkan meliputi plot kontur warna, animasi, plot perubahan bentuk dan plot grafik X-Y.

Apabila dibentuk menjadi sebuah diagram alir, maka analisis dalam ABAQUS sebagai berikut:



Gambar 11. Diagram aliran proses running pada *software* ABAQUS CAE
Sumber: Hastomo (2009)