

TUGAS AKHIR
STUDI PEMODELAN BERBASIS FEM BALOK BETON
BERTULANG MENGGUNAKAN LUSAS 14.0 YANG
DIPERKUAT DENGAN GFRP



DISUSUN OLEH :

ANASTASIA MANI' SARUNGALLO

D 111 09 013

JURUSAN SIPIL FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2013



**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS HASANUDDIN FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK SIPIL**

KAMPUS TAMALANREA TELP. (0411) 587 636 FAX. (0411) 580 505 MAKASSAR 90245
E-mail : sipil.unhas@yahoo.co.id

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S1 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.

Judul : ***“Studi Pemodelan Berbasis FEM Balok Beton Bertulang Menggunakan LUSAS 14.0 Yang Diperkuat Dengan GFRP”***

Disusun Oleh :

Nama : Anastasia Mani' Sarungallo

D111 09 013

Telah diperiksa dan disetujui
Oleh Dosen Pembimbing

Makassar. 8 November 2013

Pembimbing I

Dr. Rudy Djamaluddin, ST. M.Eng.
Nip. 19701108 1994121001

Pembimbing II

Ir. H. Abd. Madjid Akkas, MT.
Nip. 19490910 1983 1 003

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Sipil,



Prof. Dr. Ir. H. Lawalenna Samang, MS.M.Eng.
Nip. 19601231 198503 1 001

Abstract

In this era, has developed improved methods of repair and retrofitting for structure with matrix or binder, known as Fibre Reinforced Polymer (FRP). Research on the behavior of reinforced concrete beams retrofitted by GFRP previously have been done in the laboratory. However, laboratory results can't provide the complete information or data because the limited ability of the tools and testing methods. To get the accurate experimental results of the test, we need more specimens and it will be need much money. To overcome this problem, we try to modeling based on Finite Element Method (FEM). The research method that we used is a simulation laboratory using LUSAS 14.0 based of finite element method. The test results then compared with the results of laboratory testing. The test results using the program LUSAS 14.0 shows that the result is similiar with the result of laboratory. If we comparison with the normal beam that reinforced concrete beams without refrofitted by GFRP, it would show that the reinforced concrete beams retrofitted by GFRP will give increase the capacity of the receiving load beam is equal to 36%. LUSAS modeling results also show the distribution of strain that occurs in the steel reinforcement and GFRP along the span. Given the more load on the beam, will increase the strain of steel and GFRP of the end to the middle of the span and the maximum strain occurs in the loading area.

Keywords: Reinforced Concrete Beams, Reinforcement Structure, Glass Fibre Reinforced Poly

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas segala berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul "**STUDI PEMODELAN BERBASIS FEM BALOK BETON BERTULANG MENGGUNAKAN LUSAS 14.0 YANG DIPERKUAT DENGAN GFRP**", sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Hasanuddin. Tugas akhir ini disusun berdasarkan hasil penelitian menggunakan program LUSAS 14.0.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa selesainya tugas akhir ini berkat bantuan dari berbagai pihak, utamanya dosen pembimbing :

Pembimbing I : **Dr. Rudy Djamaluddin, ST. M.Eng.**

Pembimbing II : **Ir. H. Abdul Madjid Akkas, MT.**

Dengan segala kerendahan hati, saya juga ingin menyampaikan terima kasih serta penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. **Ayahanda dan Ibunda tercinta**, Sedan Sarungallo dan Esther M. Palambang dukungan dan doanya selama ini.
2. Bapak **DR. Ing Ir. Wahyu H. Piarah, MS, ME.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
3. Bapak **Prof. Dr. Ir. H. Lawalenna Samang, MS., M.Eng.** selaku ketua Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

4. Bapak **Dr. Rudy Djamaluddin, ST. M.Eng**, selaku dosen pembimbing I, yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
5. Bapak **Ir. H. Abdul Madjid Akkas, MT.**, selaku dosen pembimbing II, yang telah banyak meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan kepada saya.
6. Seluruh dosen, staf dan karyawan Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Hasanuddin.
7. Tak Lupa juga kepada nenek Tallo tercinta yang semasa hidupnya sangat memberikan dukungan kepada saya.
8. Saya juga menghaturkan terimakasih kepada **Stewart Morison** selaku *senior account manager* of LUSAS yang telah dengan sabar membantu dan menjawab pertanyaan – pertanyaan saya.
9. Terima kasih pula buat saudara-saudara saya di Jl. Bangau Soni, Sita, Rapa', Ugi', Fani, Buntu, Lito, Patrik, Merlin, Susang dan Jesika yang telah memberikan doa, dukungan dan motivasi.
10. Saya juga menghaturkan terima kasih kepada Pak Hairil, Ka' Cecep, teman-teman angkatan 2009 khususnya Dio, Nur, Mba Titik, Cempana, Novia, Dewi, Ayu, Mila, Ronal Tappi, Shani, Dian dkk, Depur dkk, Jein dkk, serta teman-teman yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang senantiasa memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Saya menyadari bahwa tulisan ini tidak luput dari kekurangan-kekurangan. Oleh karena itu penulis mengharapkan kepada para pembaca, kiranya dapat memberikan sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini.

Akhir kata, semoga Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan rahmat-Nya kepada kita, dan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pihak-pihak yang berkepentingan.

Makassar, November 2013

Penyusun

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR	x
BAB I PENDAHULUAN.....	I-1
1.1 Latar Belakang	I-1
1.2 Rumusan Masalah	I-4
1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian.....	I-5
1.3.1 Maksud Penelitian	I-5
1.3.2 Tujuan Penelitian.....	I-5
1.4 Batasan Masalah.....	I-5
1.5 Manfaat Penelitian	I-6
1.6 Sistematika Penulisan	I-6
BAB I TINJAUAN PUSTAKA	II-1
2.1 Tinjauan Umum	II-1
2.1.1 Beton Bertulang.....	II-2
2.1.2 Perekat (Adhesive)	II-7
2.1.3 Fibre Reinforced Polymer (FRP).....	II-7
2.1.3.1 Fibre	II-8
2.1.3.2 Glass Fibre Reinforced Polymer	II-9

2.2 Diskripsi Metode Elemen Hingga.....	II-10
2.2.1 Finite Element Analysis	II-13
2.2.2 LUSAS 14.0	II-15
2.2.2.1 Pemodelan.....	II-17
2.2.2.2 Analisis Statis Non Linear	II-22
2.2.2.3 Kesatuan Elemen 2 Dimensi	II-28
2.2.2.4 Model Material Plastic – Isotropic.....	II-31
2.2.2.5 Joint Element Meshes	II-33
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	III-1
3.1 Rancangan Penelitian	III-1
3.2 Penetapan Model.....	III-1
3.3 Variasi Benda Uji.....	III-3
3.4 Finite Elemen untuk Beton.....	III-4
3.5 Pemodelan Baja Tulangan.....	III-4
3.5.1 Diskretisasi	III-4
3.5.2 Memodel Distribusi	III-5
3.6 Input Data	III-5
3.7 Pembebanan	III-5
3.8 Pemodelan FEM LUSAS	III-7
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	IV-1
4.1 Pemodelan.....	IV-1
4.2 Output Analisis	IV-6
4.2.1 Hubungan Beban dan Lendutan	IV-6

4.2.2 Hubungan beban dan regangan	IV-9
4.2.3 Kontur Tegangan	IV-10
4.2.4 Pola Retak.....	IV-14
4.2.5 Distribusi Regangan	IV-15
4.2.6 <i>Displacement</i> pada lekatan beton dan GFRP	IV-18
4.2.7 Distribusi Regangan pada tengah bentang sepanjang ketinggian balok	IV-19
 BAB V PENUTUP.....	 V-1
5.1 Kesimpulan	V-1
5.2 Saran.....	V-1
 DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik material resin epoxy.....	II-8
Tabel 2.2 Karakteristik material GFRP	II-10
Tabel 3.1 Variasi benda uji.....	III-3
Tabel 3.2 Ringkasan input data pada LUSAS	III-6
Tabel 4.1 Hubungan beban dan lendutan	IV-7
Tabel 4.2 Beban maksimum	IV-8
Tabel 4.3 Jarak masing – masing node dari tengah bentang	IV-16

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Mode kegagalan pada beton bertulang yang diperkuat FRP	I-3
Gambar 2.1	Kurva Tegangan Regangan Beton.....	II-3
Gambar 2.2	Kurva Tegangan Regangan Baja	II-4
Gambar 2.3	Kedudukan batang tulangan dalam balok beton bertulang.....	II-5
Gambar 2.4	Analisis lentur balok persegi bertulang rangkap	II-6
Gambar 2.5	Tampilan jendela LUSAS.....	II-17
Gambar 2.6	Tegangan Regangan untuk Baja Tulangan.....	II-22
Gambar 2.7	Contoh sederhana penggabungan dua material baja	II-23
Gambar 2.8	Perilaku hubungan tegangan – regangan material beton	II-24
Gambar 2.9	Elemen 1-dimensi.....	II-26
Gambar 2.10	Penambahan Beban yang Bekerja pada Model Kantilever yang menggunakan elemen 1-dimensi	II-26
Gambar 2.11	Elemen 2-dimensi.....	II-27
Gambar 2.12	Variasi elemen 3-dimensi.....	II-28
Gambar 2.13	Contoh ilustrasi menggunakan tipe Plane Stress.....	II-29
Gambar 2.14	Tegangan bidang pada sumbu x dan y	II-30
Gambar 2.15	Kurva Hardening	II-33
Gambar 2.16	Springs yang menghubungkan 2 node dalam 2D.....	II-35
Gambar 3.1	Flowchart prosedur analisis.....	III-2
Gambar 3.2	Desain beban pada balok	III-3
Gambar 3.3	Desain Penulangan	III-3
Gambar 4.1	Pemodelan geometri pada LUSAS	IV-2

Gambar 4.2	Hasil meshing pada model.....	IV-2
Gambar 4.3	Hasil assign material pada model.....	IV-3
Gambar 4.4	Posisi tumpuan dalam model.....	IV-4
Gambar 4.5	Posisi beban dalam model	IV-4
Gambar 4.6	Parameter pada nonlinear control.....	IV-5
Gambar 4.7	Hasil pemodelan LUSAS	IV-5
Gambar 4.8	Grafik hubungan beban dan lendutan balok normal.....	IV-6
Gambar 4.9	Grafik hubungan beban dan lendutan B1G1	IV-6
Gambar 4.10	Grafik hubungan beban dan regangan baja balok normal	IV-9
Gambar 4.11	Grafik hubungan beban dan regangan baja balok B1G1.....	IV-10
Gambar 4.12	Kontur tegangan beton balok normal $P_{cr} = 5,5$ kN.....	IV-10
Gambar 4.13	Kontur tegangan beton balok normal $P_y = 15,8$ kN.....	IV-11
Gambar 4.14	Kontur tegangan beton balok normal $P_u = 16,58$ kN.....	IV-11
Gambar 4.15	Kontur tegangan baja pada balok normal.....	IV-11
Gambar 4.16	Kontur tegangan beton balok B1G1 $P_{cr} = 9$ kN.....	IV-12
Gambar 4.17	Kontur tegangan beton balok B1G1 $P_y = 17,11$ kN.....	IV-12
Gambar 4.18	Kontur tegangan beton balok B1G1 $P_u = 22,58$ kN.....	IV-13
Gambar 4.19	Kontur tegangan baja B1G1	IV-13
Gambar 4.20	Pola retak balok normal $P_{cr} = 5,5$ kN	IV-14
Gambar 4.21	Pola retak balok normal $P_y = 15,8$ kN	IV-14
Gambar 4.22	Pola retak balok normal $P_u = 16,58$ kN	IV-14
Gambar 4.23	Pola retak balok B1G1 $P_u = 22,58$	IV-15
Gambar 4.24	Rancangan posisi dan identifikasi node	IV-15

Gambar 4.25	Grafik distribusi regangan baja balok B1G1	IV-16
Gambar 4.26	Grafik distribusi regangan GFRP pada balok B1G1	IV-17
Gambar 4.27	Grafik hubungan Δx beton dan GFRP dengan panjang bentang	IV-18
Gambar 4.28	Distribusi regangan balok normal pada tengah bentang.....	IV-19
Gambar 4.29	Distribusi regangan B1G1 pada tengah bentang	IV-20

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Desain struktur merupakan salah satu bagian dari keseluruhan proses perencanaan bangunan. Beton bertulang merupakan material yang banyak digunakan untuk membuat struktur bangunan karena material pembentuknya yang mudah didapat. Kajian tentang perilaku struktur beton bertulang pada umumnya diperoleh dari hasil pengujian eksperimental di laboratorium. Pengetahuan tentang perilaku beton sangatlah penting untuk menghindari terjadinya kesalahan struktural pada beton ataupun dalam perbaikan atau perkuatan struktur yang mengalami kerusakan dan kesalahan desain. Saat ini, telah berkembang metode perbaikan dan perkuatan struktur dengan menggunakan bahan komposit berupa serat sebagai penguat dan polymer (resin) sebagai matrik atau pengikat yang dikenal dengan *Fibre Reinforced Polymer* (FRP). Sistem perkuatan FRP pada beton dilakukan dengan cara menempelkannya pada permukaan beton dengan menggunakan perekat epoxy. Perbaikan atau perkuatan struktur dengan bahan ini berupa komposit dengan tulangan external yang direkatkan pada permukaan beton.

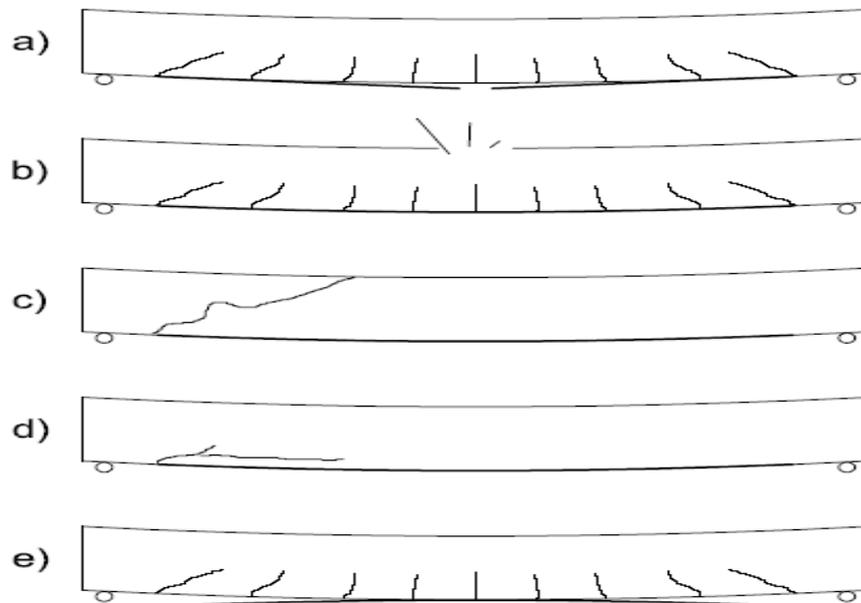
Fibre Reinforced Polymer (FRP) merupakan bahan yang ringan, kuat dan tahan terhadap korosi. FRP cukup mudah untuk ditempelkan pada beton bertulang dan terbukti ekonomis digunakan sebagai material untuk memperbaiki dan meningkatkan ketahanan struktur balok, kolom, pasangan bata, joint balok-kolom dan bagian struktur lainnya terhadap gempa bumi. FRP dapat berbentuk lembaran, selubung atau lapisan pada permukaan beton bertulang. Alasan lain penggunaan FRP

adalah karena FRP mempunyai kekuatan ultimit yang lebih tinggi dan bobot yang lebih rendah dibandingkan dengan baja sehingga penanganannya secara signifikan menjadi lebih mudah. Secara umum, bahan serat yang digunakan pada FRP ada 3 jenis serat yaitu carbon, aramid dan glass.

Penelitian tentang perilaku balok beton bertulang dengan perkuatan lembar *Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP)* sebelumnya telah banyak dilakukan di laboratorium. Salah satu perilaku yang berkaitan dengan prediksi kegagalan balok beton bertulang dengan perkuatan lentur menurut Simonelli, 2005 ditunjukkan pada Gambar 1.1. Gambar 1.1a menunjukkan kegagalan yang disebabkan oleh melelehnya baja tulangan yang diikuti oleh putusnya FRP. Gambar 1.1b menunjukkan kegagalan disebabkan oleh hancurnya beton akibat desakan, kasus seperti ditunjukkan pada Gambar 1.1c adalah kegagalan geser yang biasanya dimulai dari ujung lembaran FRP dan menyebar sampai balok hancur. Gambar 1.1d menunjukkan kasus *bond split* yaitu lepasnya beton penutup baja tulangan pada bagian tarik dan akan terus menyebar sepanjang baja tulangan, pada kasus seperti Gambar 1.1e disebut sebagai pengelupasan (*laminat peeling*) yaitu lepasnya perekat antara permukaan beton dan lembaran FRP yang biasanya disebabkan oleh kohesif beton yang lebih lemah dari epoxy resin sebagai perekat antara beton dan FRP.

Namun, hasil penelitian laboratorium yang diperoleh tidak sepenuhnya memberikan informasi atau data yang lebih akurat dikarenakan adanya keterbatasan kemampuan alat dan metode pengujian yang dilakukan karena untuk mendapatkan hasil eksperimental yang lebih akurat tersebut diperlukan data pengujian yang cukup

banyak sehingga diperlukan jumlah benda uji yang banyak pula. Hal ini tentunya juga akan membutuhkan biaya yang relative mahal.



Gambar 1.1 Mode kegagalan pada beton bertulang yang diperkuat dengan FRP

Untuk mencoba menanggulangi hal tersebut maka digunakanlah pemodelan berbasis *Finite Element Method (FEM)*. FEM adalah sebuah metode untuk solusi numerik dari masalah yang biasa dijumpai di lapangan. Bila suatu kontinum dibagi-bagi menjadi beberapa bagian yang lebih kecil, maka bagian-bagian kecil ini disebut elemen hingga. Proses pembagian suatu kontinum menjadi elemen-elemen hingga ini sering dikenal sebagai proses diskretisasi atau pembagian. Secara umum metode elemen hingga memiliki beberapa kelebihan, diantaranya:

1. Metode elemen hingga dapat digunakan pada berbagai masalah, analisa tegangan, analisa medan magnet dan masih banyak lagi.

2. Metode elemen hingga tidak membatasi geometri dari benda, benda apapun dapat dimodelkan.
3. Kondisi batas dan pembebanan yang dilakukan juga tidak dibatasi.
4. Data material yang yang didefinisikan pada elemen juga tidak dibatasi, sehingga pada elemen tersebut dapat diubah-ubah data materialnya sesuai kebutuhan.
5. Dapat menggabungkan beberapa tipe elemen, contohnya pada beton.
6. Memberikan data output yang lebih rinci dan akurat.

Oleh sebab itu berdasarkan dengan pertimbangan diatas maka dalam penelitian tentang perilaku balok beton bertulang yang diperkuat dengan GFRP ini dilakukan dengan pemodelan berbasis *finite element method* atau metode elemen hingga yaitu LUSAS 14.0. Dengan simulasi pengujian ini diharapkan hasil yang diperoleh dari pengujian laboratorium adalah sama dan dilengkapi dengan data – data parameter lainnya yang lebih jelas dan akurat.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan pada latar belakang, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah

1. Bagaimanakah perilaku balok beton bertulang yang diperkuat dengan GFRP hasil pemodelan berbasis FEM.
2. Bagaimana perbandingan hasil pengujian yang diperoleh dengan pemodelan berbasis FEM dan pengujian yang dilakukan di laboratorium.

1.3. Maksud dan Tujuan Penelitian

1.3.1. Maksud penelitian :

Adapun maksud dari penelitian ini adalah dalam rangka penyelesaian program studi Strata 1 pada Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

1.3.2. Tujuan Penelitian

Tujuan yang diharapkan dalam penyusunan Tugas Akhir ini adalah:

1. Menganalisa perilaku balok beton bertulang yang diperkuat GFRP.
2. Menganalisa hasil yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan dengan menggunakan program *finite element method* jika dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan di laboratorium

1.4. Batasan Masalah

Untuk mempermudah penyelesaian Tugas Akhir ini tanpa mengurangi bobot penelitian, maka dalam menyusun studi ini perlu diberikan batasan-batasan. Batasan masalah akan dijelaskan sebagai berikut :

1. Parameter penelitian adalah perilaku balok yaitu hubungan beban dan lendutan, distribusi tegangan dan distribusi regangan yang terjadi dari pembebanan pada beton bertulang yang dilakukan yang diperkuat dengan GFRP.
2. Benda uji yang dimodelkan adalah balok beton bertulang dengan ukuran 15 x 20 x 270 cm dan menggunakan mutu beton $f'c = 25$ MPa.
3. Program simulasi penelitian yang digunakan adalah berbasis *finite element* yaitu LUSAS 14.0.

1.5. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi dan masukan seperti berikut :

1. Sebagai sumber pengetahuan dan informasi mengenai perilaku balok beton bertulang yang diperkuat dengan lembar GFRP sehingga pemanfaatan FRP sebagai material perkuatan (retrofit) dapat maksimal.
2. Sebagai salah satu bahan referensi untuk penelitian selanjutnya khususnya pada penelitian dengan menggunakan simulasi pengujian berbasis FEM.

1.6. Sistematika Penulisan

Penulisan ini dilakukan secara sistematis yang dirangkum dalam beberapa bab sebagai berikut :

BAB I Pendahuluan

Pada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang, maksud penulisan, tujuan penulisan, ruang lingkup dan batasan masalah serta sistematika penulisan yang digunakan dalam tugas akhir ini sehingga dapat dipahami secara sistematis.

BAB II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi teori-teori yang berhubungan dengan penelitian yang diperoleh dari studi literatur.

BAB III Metodologi Penelitian

Merupakan bahan mengenai rancangan penelitian, penetapan model, variasi benda uji dan langkah – langkah dalam teknik pemodelan.

BAB IV Hasil dan Pembahasan

Merupakan hasil yang diperoleh dari pengujian serta pembahasan dari hasil analisis yang diperoleh.

BAB V Penutup

Merupakan bab penutup yang berisikan kesimpulan disertai dengan saran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Aplikasi material *Fiber Reinforced Polymer* atau FRP sebagai fungsi perbaikan dan perkuatan struktur beton yang sudah ada telah berkembang pesat di beberapa negara. Di Indonesia sendiri, pengaplikasian material FRP ini juga telah dilakukan pada pembangunan gedung – gedung bertingkat. Pembebanan yang terjadi secara terus menerus atau penambahan beban pada bangunan diluar beban rencana sering menimbulkan bencana keruntuhan bangunan. Untuk mencegah hal tersebut maka salah satu cara perkuatan adalah dengan metode *external reinforcement* yaitu pemberian FRP yang direkatkan pada permukaan komponen beton.

Fungsi perkuatan dengan sistim komposit FRP adalah untuk meningkatkan kekuatan atau memberikan peningkatan kapasitas lentur, geser, axial dan daktilitas, atau berbagai kombinasi lainnya. 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 sistim perkuatan adalah harga material yang relatif lebih mahal.

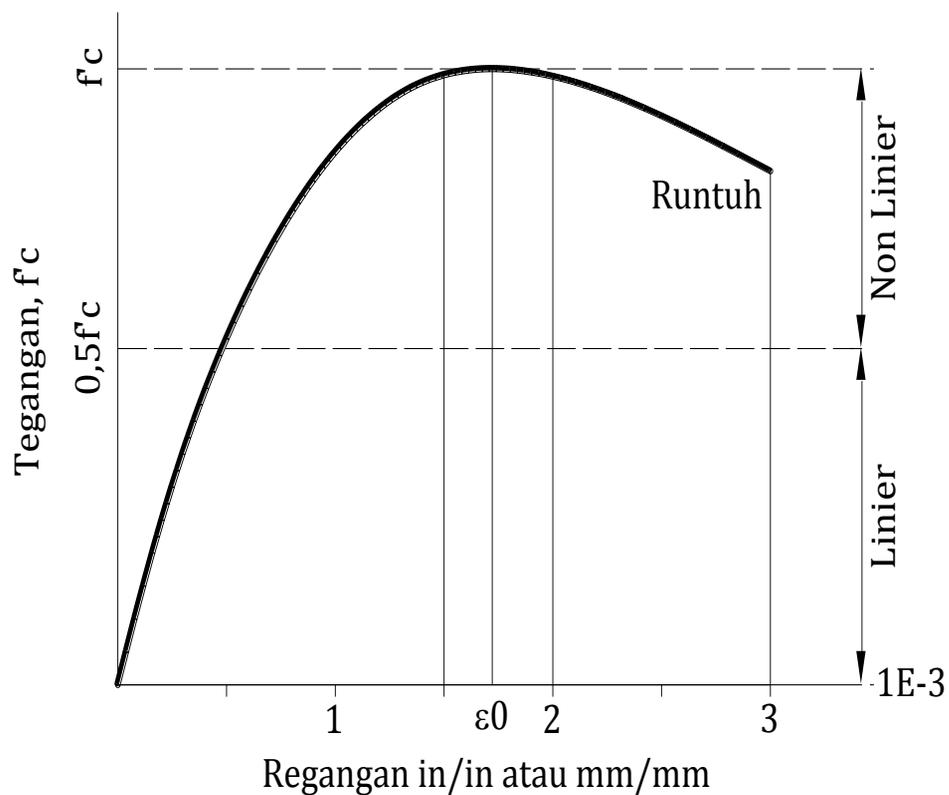
FRP dapat digunakan untuk meningkatkan kapasitas lentur dan geser balok beton bertulang, lentur pelat, desak, geser dan lentur kolom. FRP dalam bentuk lembaran, plat atau batangan dapat dipasang pada permukaan balok atau plat yang

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.

2.1.1 Beton bertulang

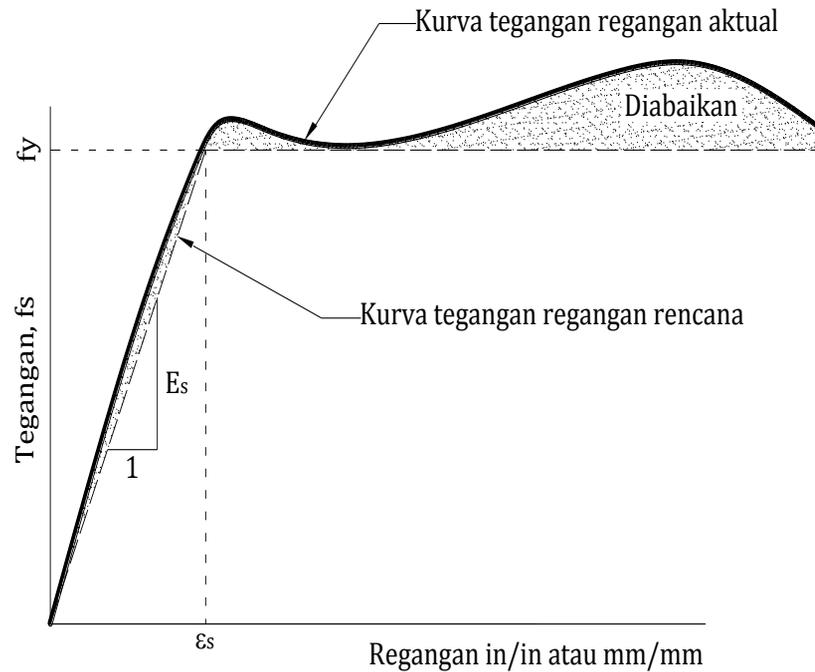
Beton bertulang merupakan struktur yang sangat lazim dalam dunia konstruksi. Material konstruksi beton bertulang mempunyai sifat yang unik dibandingkan dengan material lain seperti kayu, baja, aluminium atau plastik karena beton bertulang adalah material konstruksi yang menggunakan dua jenis bahan yang berbeda secara bersamaan. Beton bertulang adalah gabungan dua jenis bahan yaitu beton polos, yang memiliki kekuatan tekan yang tinggi akan tetapi mempunyai kekuatan tarik yang rendah, dan batangan baja yang ditanamkan di dalam beton yang dapat memberikan kekuatan tarik yang diperlukan. Beton berfungsi untuk menahan gaya tekan yang diakibatkan oleh beban-beban yang diberikan dan tulangan besi untuk menahan gaya tarik yang terjadi. Dengan demikian prinsip-prinsip yang mengatur perencanaan struktur dari beton bertulang dalam beberapa hal berbeda dengan prinsip-prinsip yang mengatur perencanaan struktur dari bahan yang terdiri dari satu macam saja. Kurva Tegangan-Regangan menunjukkan suatu kurva tegangan regangan tipikal yang diperoleh dari hasil penelitian menggunakan spesimen beton silinder yang dibebani tekan uniaksial hingga beton hancur. Prilaku tegangan regangan masih bersifat linier pada saat tegangan pada nilai $0,5f'_c$, dan berubah menjadi nonlinier jika tegangan lebih besar dari $0,5f'_c$. Tegangan maksimum (f'_c) terjadi pada regangan antara 0,0015 dengan 0,002. Regangan pada tegangan puncak

disebut $\epsilon_0 = 2,4 \times 10^{-4} \sqrt{f'_c}$. Regangan batas/ultimate beton berkisar antara 0,003 hingga 0,008 namun dalam praktek antara 0,003 hingga 0,004. ACI menetapkan batas aman atau *lower bound* regangan maksimum serat desak beton sebesar $\epsilon_{cu} = 0.003$ (begitupula dengan SNI 03 – 2847 – 2002) sementara BS 8110 menetapkan $\epsilon_{cu} = 0.0035$.. Gambar 2.1 menunjukkan kurva tegangan-regangan pada beton.



Gambar 2.1 Kurva tegangan-regangan beton

Kurva tegangan regangan baja akibat beban tarik seperti pada gambar 2.2. Nilai modulus elastisitas baja bernilai $E_s = 200.000$ Mpa. f_y adalah nilai tegangan yang diberikan ke baja yang mengakibatkan melelehnya baja. Jika tegangan baja $f_s < f_y$, maka $f_s = E_s * \epsilon_s$, namun jika tegangan baja tulangan $\epsilon_s > f_y/E_s$, maka $f_s = f_y$.

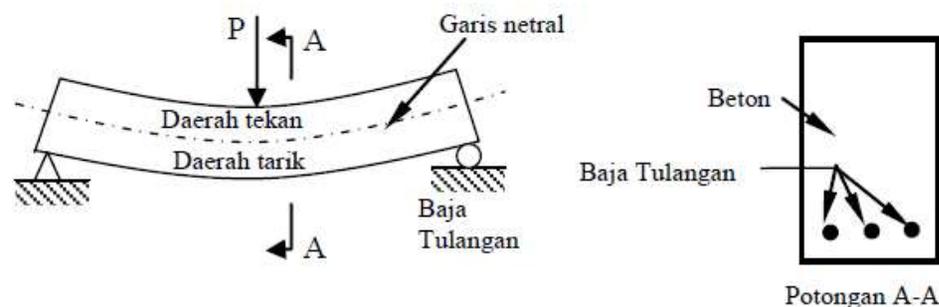


Gambar 2.2 Kurva tegangan regangan baja

Keutamaan dan kekurangan antara beton dengan baja sebagai bahan penyusun beton bertulang adalah :

1. Beton memiliki kekuatan tarik yang buruk (hanya 10-15% dari kekuatan tekannya) sedangkan baja memiliki kekuatan tarik yang bagus.
2. Beton memiliki kekuatan tekan yang bagus, baja juga memiliki kuat tekan yang bagus namun karena kelangsingannya sehingga mudah menekuk.
3. Beton memiliki kekuatan geser yang cukup bagus, baja juga memiliki kekuatan geser yang bagus.
4. Beton memiliki keawetan yang bagus, baja akan berkarat jika tidak terlindungi.
5. Beton memiliki ketahanan akan kebakaran, baja akan kehilangan kekuatannya secara cepat pada temperatur tinggi.

Penerapan beton bertulang dapat ditunjukkan dalam struktur balok. Balok merupakan elemen struktur yang bekerja untuk menahan lentur dan deformasi. Gambar 2.3 memperlihatkan kekuatan balok yang secara nyata dapat ditingkatkan dengan menambahkan batangan-batangan baja di daerah tarik. Baja dan beton dapat bekerja sama atas beberapa alasan yaitu (1) lekatan (bond, atau interaksi antara batangan baja dengan beton keras disekelilingnya) yang mencegah slip relatif antara baja dan beton, (2) campuran beton yang memadai memberikan sifat anti resap yang cukup dari beton untuk mencegah karat baja dan (3) angka kecepatan muai yang hampir serupa yaitu dari 0,0000055 sampai dengan 0,000075.



Gambar 2.3 Kedudukan batang – batang tulangan dalam balok beton bertulang

Distribusi tegangan akibat beban lentur akan menyebabkan serat bagian atas balok tertekan dan serat bagian bawah balok tertarik. Pada saat beban ditingkatkan, balok tersebut menahan regangan dan defleksi tambahan yang menyebabkan retak-retak lentur sepanjang serat tarik dari balok tersebut.

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

1. Kondisi *Balanced Reinforced*

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

Kondisi regangan : $\epsilon_c = 0.003$ dan $\epsilon_s = \frac{fy}{E_s}$

Pada kondisi ini berlaku : $\rho = \rho_{balanced}$ dan $\epsilon_s = \epsilon_y$

2. Kondisi *Over-Reinforced*

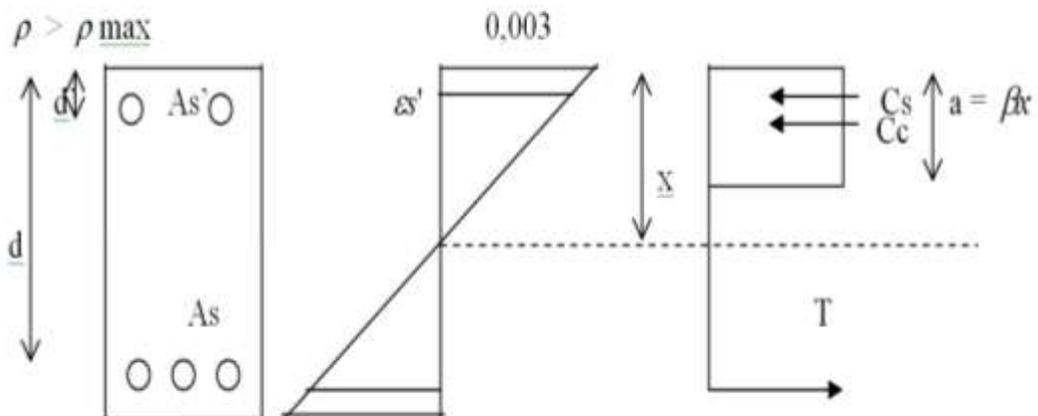
Kondisi terjadi apabila tulangan yang digunakan lebih banyak dari yang diperlukan dalam keadaan balanced. Keruntuhan ditandai dengan hancurnya penampang beton terlebih dahulu sebelum tulangan baja meleleh.

Pada kondisi ini berlaku : $\rho > \rho_{balanced}$ dan $\epsilon_s < \epsilon_y$

3. Kondisi *Under-Reinforced*

Kondisi ini terjadi apabila tulangan tarik yang dipakai pada balok kurang dari yang diperlukan untuk kondisi balanced. Keruntuhan ditandai dengan lelehnya tulangan baja terlebih dahulu dari betonnya.

Pada kondisi ini berlaku : $\rho < 75\% \rho_{balanced}$ dan $\epsilon_s > \epsilon_y$



Gambar 2.4 Analisis lentur balok persegi bertulang rangkap

Analisis lentur balok persegi bertulang rangkap seperti pada gambar 2.4 berhubungan dengan penentuan kuat nominal lentur M_n suatu penampang dengan nilai-nilai b , d , d' , A_s , A_s' , f_c' dan f_y , untuk analisis balok beton bertulang rangkap pada dasarnya tidak jauh berbeda dengan balok persegi bertulang tunggal. Yang terpenting untuk dianalisis bahwa tegangan tulangan tekan (f_s') yang merupakan fungsi dari regangan yang berada tepat pada posisi titik berat tulangan tekan.

2.1.2 Perekat (Adhesive)

FRP direkatkan pada permukaan elemen struktur secara kimiawi dengan perekat. Perekatan secara kimiawi sangat praktis karena tidak menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan, lebih mudah dilaksanakan dibandingkan dengan perekat mekanis dan tidak menyebabkan kerusakan pada material dasar atau material kompositnya. Perekat yang paling cocok digunakan pada material komposit adalah perekat yang mempunyai bahan dasar epoxy resin. Perekat ini dibuat dari campuran dua komponen. Komponen utamanya adalah cairan organik yang diisikan kedalam kelompok epoxy, mengikat susunan satu atom oksigen dan dua atom karbon. Reaksi ini ditambahkan pada campuran untuk mendapatkan campuran akhir. Permukaan yang akan dilekatkan harus dipersiapkan untuk mendapatkan lekatan yang efektif. Permukaan harus bersih dan kering, bebas dari kontaminan seperti: oksida, oli, minyak dan debu.

2.1.3 Fibre Reinforced Polymer (FPR)

Material komposit dibentuk oleh dua material atau lebih yang mempunyai sifat alami dan makroskopik yang berbeda. Pada fiber komposit, dua material itu

adalah fiber mutu tinggi dan resin. Sifat mekanik komposit adalah yang paling bertanggung jawab pada jenis ini, tergantung dari arah dan jumlah serat. Sedangkan fungsi resin adalah untuk mentransfer tegangan dari dan ke serat fiber

Tabel 2.1 Karakteristik Material Resin Epoksi

SIFAT MATERIAL EPOXI		
Waktu pengeringan : 72 Jam (Suhu ruang :60°C)		
SIFAT MATERIAL	METODE ASTM	NILAI TEST
Kekuatan Tarik	ASTM D-638	72.4 Mpa
Modulus Tarik		3.18 Gpa
Persen Regangan	ASTM D-638	5%
Kekuatan Lentur	ASTM D-790	123.4 Mpa
Modulus Lentur	ASTM D-790	3.12 Gpa

Sumber : *Fyfo.Co LLC*

2.1.3.1 Fiber

Secara spesifik, *fibre* sebagai material yang diaplikasikan sebagai perkuatan dapat berupa serat kaca, karbon dan kevlar. Masing-masing mempunyai kemiripan antara yang satu dengan yang lainnya. Pemilihan tipe *fibre* untuk aplikasi tertentu sangat tergantung pada beberapa faktor seperti tipe struktur, beban yang direncanakan, kondisi lingkungan dan lain-lain. *Fibre* diproduksi berbentuk:

1. Lembaran, pada umumnya mempunyai arah serat sembarang meskipun ada yang mempunyai arah serat biaxial dan triaxial, diatas lapisan bagian belakang yang dapat dilepas atau berbentuk anyaman.

2. *Fibre* yang sebelumnya dicairkan dengan resin, dimana perawatannya dilakukan dengan pemanasan atau dengan cara lain.

Fibre produksi pabrik, kemungkinan mempunyai perbandingan kekuatan searah serat 70 % dan ke arah melintang serat sebesar 30 %. Fiber mempunyai ketebalan minimum 0,1 mm dengan lebar 500 mm atau lebih.

2.1.3.2 Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)

Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) merupakan material bahan konstruksi yang terus dikembangkan oleh sebagian kalangan. Material ini cukup memiliki banyak keuntungan yang dapat diberikan yaitu merupakan material yang tahan korosi, mempunyai kuat tarik yang tinggi, superior dalam daktilitas, lebih ringan sehingga tidak memerlukan peralatan yang berat untuk dibawa ke lokasi. Beberapa jenis serat kaca yang tersedia di pasaran adalah :

- (a) *E-Glass*, yang memiliki kandungan alkali yang lebih rendah dan merupakan jenis yang paling banyak digunakan. Keuntungannya memiliki sifat mekanis yang tinggi
- (b) *Z-Glass*, digunakan untuk mortar semen dan beton karena memiliki resistensi yang tinggi terhadap serangan alkali
- (c) *A-Glass*, yang memiliki kandungan alkali tinggi
- (d) *C-Glass*, yang digunakan untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan korosi yang besar untuk asam, seperti aplikasi kimia.
- (e) *S atau R-Glass*, yang diproduksi untuk ekstra kekuatan tinggi dan modulus yang tinggi.

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*)

Tabel 2.2 Karakteristik material GFRP

KEADAAN LEPAS		KEADAAN KOMPOSIT		
SIFAT MATERIAL	NILAI TEST	SIFAT MATERIAL	NILAI TEST	
			TEST	DESAIN
Tegangan Tarik	3.24 GPa	Tegangan Ultimit	575 MPa	460 MPa
Modulus Tarik	72.4 GPa	Regangan	0.022	0.022
Regangan Maks.	0.045	Modulus Tarik	26.1 GPa	20.9 GPa
Kerapatan	2.55 g/cm ³	Teg. Tarik ultimit	25.8 GPa	20.7 GPa
Tebal Fiber	0.366 mm	Tebal komposit	1.3 mm	1.3 mm

Sumber : *Fyfo.Co LLC*

2.2 Diskripsi Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan problem matematis dari suatu gejala phisis. Tipe masalah teknis dan matematis phisis yang dapat diselesaikan dengan metode elemen hingga terbagi dalam dua kelompok, yaitu kelompok analisa struktur dan kelompok masalah – masalah non – struktur.

Tipe – tipe permasalahan struktur meliputi :

1. Analisa tegangan/*stress*, meliputi truss dan frame serta masalah – masalah yang berhubungan dengan tegangan – tegangan yang terkonsentrasi.
2. *Buckling*.
3. Analisa getaran.

Masalah non struktur yang dapat diselesaikan dengan menggunakan metode ini meliputi :

1. Perpindahan panas dan massa.
2. Mekanika fluida termasuk aliran fluida lewat media poros.
3. Distribusi dari potensial listrik dan potensial magnet.

Pada tahap analisis struktur, seringkali dipergunakan model matematis yang biasanya diekspresikan dalam hubungan atau ketergantungan antara satu atau beberapa besaran dengan satu atau beberapa besaran lainnya. Hubungan ini umumnya dinyatakan dalam bentuk persamaan difrensial biasa, persamaan difrensial parsial atau persamaan lainnya. Kenyataannya banyak persoalan analisis struktur yang sangat rumit sehingga solusi dari model struktur tidak dapat diselesaikan dengan cara eksak, yaitu cara penyelesaian matematis yang solusinya secara eksak harus memenuhi hukum-hukum pembentukan model struktur (hukum keseimbangan, kompatibilitas, dan hukum bahan) disetiap titik dalam model struktur tersebut.

Cara mengatasi persoalan analisis struktur yang terlalu rumit diselesaikan secara eksak adalah dengan menggunakan aproksimasi. Meskipun solusi yang dihasilkan tidak eksak, tetapi dapat dibuat sangat dekat dengan hasil yang sebenarnya. Ada bermacam-macam metode yang sering digunakan untuk menyelesaikan

persamaan diferensial parsial atau *partial differential equation* (PDE) secara numerik, yang pada umumnya melakukan diskritisasi untuk menyederhanakan PDE menjadi persamaan diskrit simultan, antara lain metode *finite difference*, metode *finite volume*, metode *boundary element* dan metode elemen hingga. Diantara beberapa metode tersebut, metode elemen hingga menjadi salah satu yang diterima dan dipakai secara luas dalam berbagai aplikasi engineering, termasuk dalam analisis problem elastisitas struktur.

Metode elemen hingga memerlukan prosedur diskritisasi (*descretization*) untuk dapat mengubah persamaan diferensial menjadi satu set persamaan aljabar (diskrit) yang terdiri dari matrik kekakuan, vektor gaya (*force vector*), dan vektor *displacement* yang belum diketahui. Prinsip dari diskritisasi pada metode elemen hingga adalah memodelkan struktur atau memodelkan elemen struktural menjadi suatu kumpulan elemen-elemen kecil (*assemblage*). Bentuk geometrik tiap elemen dibuat sesederhana mungkin sehingga lebih mudah dianalisis daripada struktur aslinya. Proses diskritisasi dilakukan dengan cara menentukan titik-titik tertentu untuk menjadi pemodelan struktur sesungguhnya, yang dinamakan titik nodal (*nodal point*), dimana pendefinisian elemen dan analisis selanjutnya hanya mengacu pada titik-titik tersebut, bukan lagi pada struktur sesungguhnya yang masih merupakan media kontinyu. Informasi dari titik nodal serta pendefinisian elemen dipakai untuk membentuk fungsi bentuk, yang digunakan menginterpolasikan respon titik-titik nodal ke semua lokasi domain yang ditinjau. Prosedur penentuan titik-titik nodal dan mendefinisikan elemen-elemen untuk mendiskritkan domain struktur yang ditinjau inilah yang disebut dengan *meshing*.

Akan tetapi karakteristik dan bentuk geometri struktur yang ditinjau dapat berubah seiring berubahnya kondisi struktur, seperti akibat penyebaran retak (*crack propagation*) dan deformasi yang besar. Untuk mengatasi hal seperti ini biasanya perlu dilakukan deskritisasi ulang, dalam kasus metode elemen hingga disebut dengan remeshing disetiap konfigurasi domain struktur yang berubah sehingga *mesh* tetap sesuai dengan bentuk geometri yang baru.

2.2.1 Finite Element Analysis

Pada zaman sekarang ini komputer memungkinkan desain untuk menjadi dinilai jauh lebih cepat dan mudah. Mengevaluasi desain teknik yang rumit dengan model matematika yang tepat, bagaimanapun, bukanlah proses yang sederhana. Karena kita tidak dapat menghitung respon dari bentuk yang kompleks untuk setiap beban eksternal, kita harus membagi bentuk kompleks menjadi bentuk sederhana yang lebih kecil dan banyak atau yang disebut elemen hingga. Bentuk masing-masing elemen hingga adalah didefinisikan oleh koordinat nodenya. Elemen yang berdekatan dengan node umum akan berinteraksi. Analisis elemen hingga (FEA) atau yang dikenal dengan metode element hingga (FEM) adalah sebuah metode untuk solusi numerik dari masalah yang biasa dijumpai di lapangan. Suatu masalah dilapangan umumnya mengharuskan kita untuk menyelesaikan satu atau lebih variebel yang ada. Bila suatu kontinum dibagi-bagi menjadi beberapa bagian yang lebih kecil, maka bagian-bagian kecil ini disebut elemen hingga. Proses pembagian suatu kontinum menjadi elemen-elemen hingga ini sering dikenal sebagai proses diskretisasi atau pembagian. Dengan menggunakan metode elemen hingga kita dapat mengubah suatu masalah yang memiliki jumlah derajat kebebasan tidak berhingga menjadi suatu masalah yang

memiliki jumlah derajat kebebasan tertentu sehingga proses pemecahannya menjadi lebih sederhana. Tujuan utama analisis dengan menggunakan metode elemen hingga adalah untuk memperoleh nilai pendekatan tegangan yang terjadi. Sebaliknya, pendekatan dengan metode element hingga (*finite element methode*) merupakan suatu analisis pendekatan yang berdasarkan asumsi peralihan atau asumsi tegangan, bahkan dapat juga berdasarkan kombinasi dari kedua asumsi tadi dalam setiap elemennya. Secara umum metode elemen hingga memiliki beberapa kelebihan, diantaranya:

1. Metode elemen hingga dapat digunakan pada berbagai masalah, analisa tegangan, analisa medan magnet dan masih banyak lagi.
2. Metode elemen hingga tidak membatasi geometri dari benda, benda apapun dapat dimodelkan.
3. Kondisi batas dan pembebanan yang dilakukan juga tidak dibatasi.
4. Data material yang yang didefinisikan pada elemen juga tidak dibatasi, sehingga pada elemen tersebut dapat diubah-ubah data materialnya sesuai kebutuhan.
5. Dapat menggabungkan beberapa tipe elemen, contohnya pada beton bertulang.

Metode pelaksanaan analisa sebuah struktur dengan metode elemen hingga secara garis besar dapat dibagi menjadi seperti berikut :

1. Membagi struktur menjadi elemen-elemen hingga (diskretisasi).
2. Menyusun formulasi sifat atau propertis dari masing-masing elemen.
3. Menggabungkan elemen-elemen hingga dan formulasinya menjadi elemen utuh/elemen dari struktur
4. Memberikan beban sesuai rencana .

5. Menentukan kondisi batas (tergantung dari tipe tumpuan struktur)
6. Menyelesaikan persamaan yang terbentuk (hasilnya berupa *displacement* pada batas-batas antar elemen tadi.
7. Menghitung tegangan dan gaya-gaya dalam dari elemen-elemen (berdasar formulasi sifat masing-masing elemen).

2.2.2 LUSAS 14.0

LUSAS versi 14 merupakan salah satu program yang berbasis elemen hingga. Penyajian model adalah dalam bentuk grafis yang terdiri dari berbagai macam geometri seperti titik, garis, bidang, volume dan pendefinisian atribut yang berupa material, beban, tumpuan dan mesh. Program LUSAS menyediakan 100 jenis elemen yang diklasifikasikan dalam kelompok elemen sesuai dengan fungsinya yaitu: *Bars, Beams, 2D Continuum elements, 3D Continuum elements, Plates, Shell, Membranes, Joints, Field Elements* dan *Interface Elements*.

Di dalam analisis finite elemen benda dianggap sebagai kumpulan elemen kecil yang terhubung pada titik nodal. Perpindahan setiap elemen merupakan interpolasi dari perpindahan titik nodal yang menghubungkan setiap elemen. Tampilan jendela LUSAS 14.0 secara umum dapat ditunjukkan seperti pada gambar 2.6

a. Treeview

Treeview digunakan untuk mengatur berbagai aspek model dalam bingkai grafis. Pada *treeview* terdapat lima panel utama yaitu *layers, grup, attribut, loadcases* dan *utilities*.

b. Properties

Informasi umum berkaitan dengan model disajikan dalam dialog properti. Properti mungkin berhubungan dengan seluruh model atau fitur geometry. Untuk melihat properti obyek, tekan tombol mouse kanan, kemudian pilih Properties dari menu konteks.

c. Status Bar

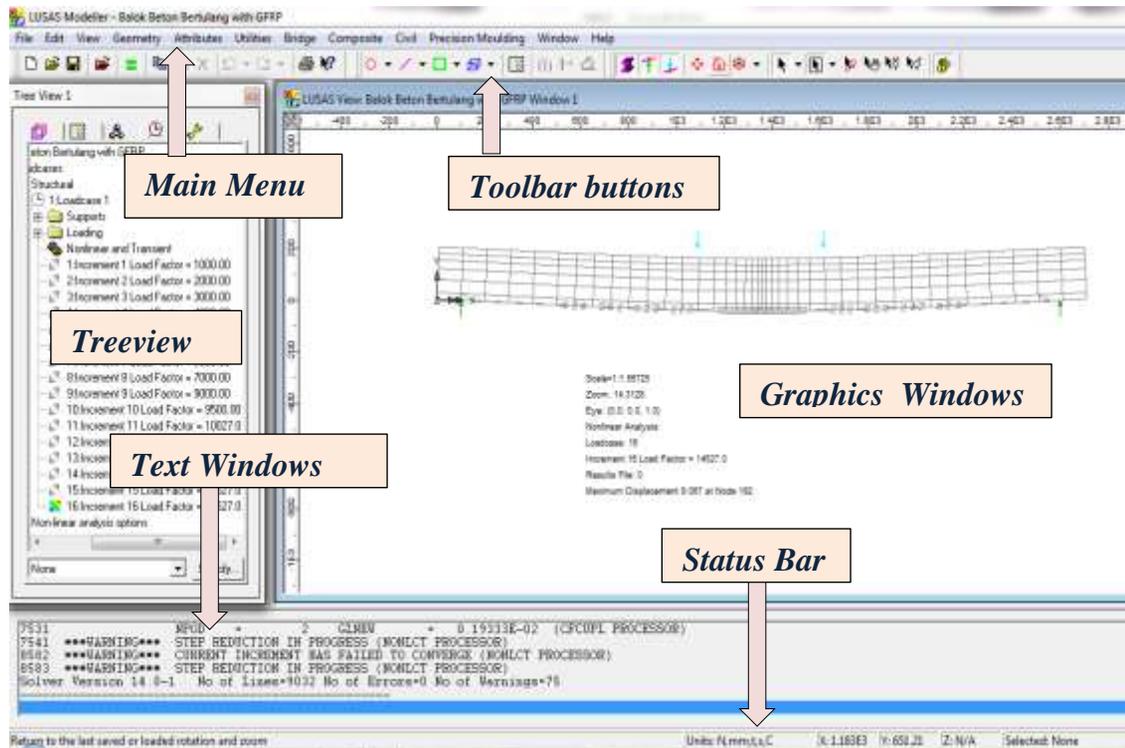
Status bar menampilkan pesan kemajuan dan bantuan teks selama sesi modeling, model unit, posisi kursor dalam model unit (jika model ditampilkan dalam ortogonal) dan jumlah item dalam pilihan saat ini. Pilihan *View > Status Bar* item menu dapat digunakan untuk menyembunyikan atau menampilkan status bar.

d. Teks Window

Teks Window memuat pesan dan peringatan selama sesi modeling. *View > Text* item menu *output* dapat digunakan untuk menyembunyikan atau menampilkan Teks Window.

e. Toolbar

Toolbar berisi tombol toolbar atau tombol pintas pemodelan. Semua toolbar dapat ditampilkan, tersembunyi, atau disesuaikan, dengan menggunakan *View > Toolbars* item menu.



Gambar 2.6 Tampilan Jendela LUSAS

2.2.2.1 Pemodelan

Secara umum pemodelan dengan menggunakan LUSAS 14.0 secara lengkap melibatkan tiga tahapan yaitu

- a. Menciptakan model
- b. Menjalankan analisis
- c. Melihat hasil

A. Menciptakan Model

Sebuah model LUSAS secara grafis diwakili oleh fitur geometri (titik (*points*), garis (*line*), bidang (*surface*), dan volume dan *attribute* (materials, pembebanan, tumpuan (*support*), *mesh* dan *geometry*). Sebuah model dibuat dengan mendefinisikan *geometry* dan *attribute* dan menandai attribute ke *geometry*.

Geometri dapat didefinisikan dengan memasukkan koordinat, memilih titik di layar, atau dengan menggunakan utilitas seperti transformasi atau dengan mengimpor dari sistem CAD. Atribut didefinisikan dari *attribute menu*. Setelah didefinisikan, maka atribut tersebut akan tercantum dalam *treeview*. *Treeview* digunakan untuk mengatur berbagai aspek model dalam bingkai grafis, memiliki lima panel yang masing-masing menunjukkan *layers*, *grup*, *attribut*, *loadcases* dan *utilities*. Untuk menyelesaikan model mungkin perlu untuk mendefinisikan data kontrol analisis. Ini digunakan untuk mengontrol kemajuan analisis.

1. Mendefinisikan *Geometry*

Pendefinisian *geometry* dapat dilakukan dengan memilih *geometry* menu pada menubar. Pada menu geometri tersedia 4 fitur utama yaitu titik, garis, bidang dan volume. Titik (*points*) mendefinisikan simpul dari model elemen hingga, garis (*line*) mendefinisikan tepi dari model elemen hingga, *surface* mendefinisikan permukaan konstruksi internal model, dan volume mendefinisikan komponen solid sederhana model. Keempat fitur tersebut dapat didefinisikan melalui menu ***Geometry > Point, Line, Surface, dan Volume.***

2. Mendefinisikan *Attributes*.

Setelah mendefinisikan *geometry*, selanjutnya adalah pendefinisian *attribute*. *Define attribute* adalah untuk mengidentifikasi dan memasukkan data propertis model struktur. Untuk mendefinisikan *attribute* dapat dilakukan dengan memilih menu ***Attributes > Mesh, Geometry, Material, Support, Loading.*** Yang termasuk didalam sistim *attribute* LUSAS adalah *mesh*, geometri, material, *support* dan pembebanan.

a. *Mesh*

Meshing adalah proses untuk menentukan model Lusas dalam hal fitur geometris yang harus dibagi menjadi elemen hingga dalam penyelesaiannya. Meshing dilakukan berbeda untuk garis, bidang atau volume. Untuk *meshing* volume, elemen yang dipilih harus didefinisikan dalam istilah dari jenis generik elemen, bentuk elemen dan interpolasi.

b. Geometri

Sifat geometrik yang digunakan untuk menggambarkan *attribute* geometris seperti ketebalan, luas, momen kedua daerah, konstan torsi dll. Properti dimasukkan atau diekstrak dari data di perpustakaan bagian. Untuk model 3-dimensi, tidak ada kebutuhan untuk menetapkan sifat geometrik.

c. Material

Setiap bagian dari model harus diberi bahan material. Dalam LUSAS 14.0 material properties terbagi atas :

- Linear dan Nonlinear Material Properties
- *Specialise Material Properties*

d. *Support*

Kondisi ini menjelaskan model tumpuan yang digunakan. Ada tiga kondisi tumpuan yang dapat digunakan yaitu *free*, *fix* dan kekakuan pegas.

e. Pembebanan (*Loading*)

Lusas 14 menyediakan berbagai macam jenis beban mulai dari beban titik, beban merata, tegangan, *displacement* dll.

3. Menandai Attribut ke Geometry.

Setelah geometri dan *attribute* didefinisikan, maka selanjutnya dilakukan *assign* (penetapan) properti geometri yang terdiri dari *meshing*, material, pembebanan, dan tumpuan (*support*). Adapun teknik penetapan (*assign*) adalah dengan *drag and drop* sehingga secara otomatis *attribute* akan terdefinisikan pada pemodelan geometri.

B. Menjalankan Analisis

Secara default, LUSAS akan melakukan analisa tegangan statis linear. Namun untuk mengatur analisis nonlinear diperlukan kontrol analisis yang merupakan *property* dari *loadcases*, dan *loadcases* ditampilkan dalam *treeview loadcase*. Dalam LUSAS 14.0 proses analisis dikenal dengan istilah solve.

Analisis nonlinier digunakan untuk model perubahan signifikan dalam geometri, bahan atau kondisi batas. Deformasi geometri yang signifikan dapat terjadi karena beban yang diterapkan. Perubahan materi dapat terjadi karena hasil material. Perubahan kondisi batas dapat terjadi dari perubahan kontak atau perilaku gesekan. LUSAS dapat digunakan untuk model numerik berbagai masalah rekayasa. Dalam LUSAS secara umum menyediakan analisis linear dan analisis nonlinier

- Analisis Linear adalah analisis yang paling umum untuk analisis elastis, analisis statis linear atau analisis stabil lapangan. Analisis elemen hingga linier mengasumsikan bahwa semua bahan berperilaku elastis linier dan dengan deformasi cukup kecil untuk secara signifikan mempengaruhi model secara keseluruhan.

- Analisis Nonlinear diperlukan karena adanya perubahan gross dalam geometri, deformasi permanen, retak struktural, tekuk, kontak antara bagian-bagian komponen.

Setelah model telah dibuat maka selanjutnya dilakukan analisis dengan memilih menu **File > Lusas Datafile**. LUSAS menciptakan sebuah file data dari model, untuk memecahkan matriks kekakuan, dan menghasilkan file hasil. File hasil akan berisi beberapa atau semua data sebagai berikut:

- | | |
|---|---------------------------|
| a. Tegangan (<i>Stress</i>) | g. <i>Reactions</i> |
| b. Regangan (<i>Strains</i>) | h. <i>Yield flags</i> |
| c. Perpindahan (<i>Displacements</i>) | i. <i>Potentials</i> |
| d. Kecepatan (<i>Velocities</i>) | j. <i>Fluxes</i> |
| e. Percepatan (<i>Accelerations</i>) | k. <i>Gradients</i> |
| f. <i>Residuals</i> | l. <i>Named variables</i> |

C. Menampilkan Hasil Analisis

Hasil yang diperoleh dapat ditampilkan dengan memilih menu **Utilities > Graph Wizard** atau dengan klik kanan pada mouse. Untuk menampilkan hasil analisis dapat melibatkan berbagai macam fitur pilihan antara lain :

- *Deformed* yaitu untuk menunjukkan deformasi yang terjadi pada hasil analisis.
- *Contur*, digunakan untuk menunjukkan kontur distribusi dari tegangan.
- *Vector*, digunakan untuk menunjukkan pola retakan pada model struktur.
- Diagram digunakan untuk menunjukkan nilai pada hasil analisis seperti tegangan.

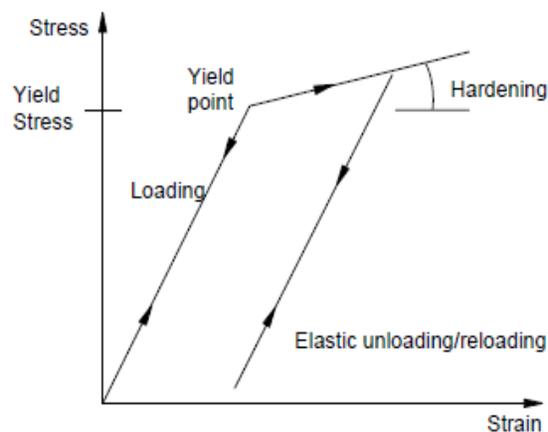
- *Graphing* yang digunakan untuk menunjukkan grafik dari hasil analisis.
- *Print Result* yang menampilkan hasil yang diperoleh untuk keseluruhan model struktur seperti tegangan baja, perpindahan dll.

2.2.2.2 Analisis Statis Non Linear

Sifat nonlinear mungkin terbangun dari beberapa bentuk termasuk defleksi yang besar, tegangan yang besar, hukum tegangan-regangan, deformasi yang tergantung dari kondisi batas, dan deformasi yang tergantung dari besarnya beban.

A. Analisis Material Non Linear

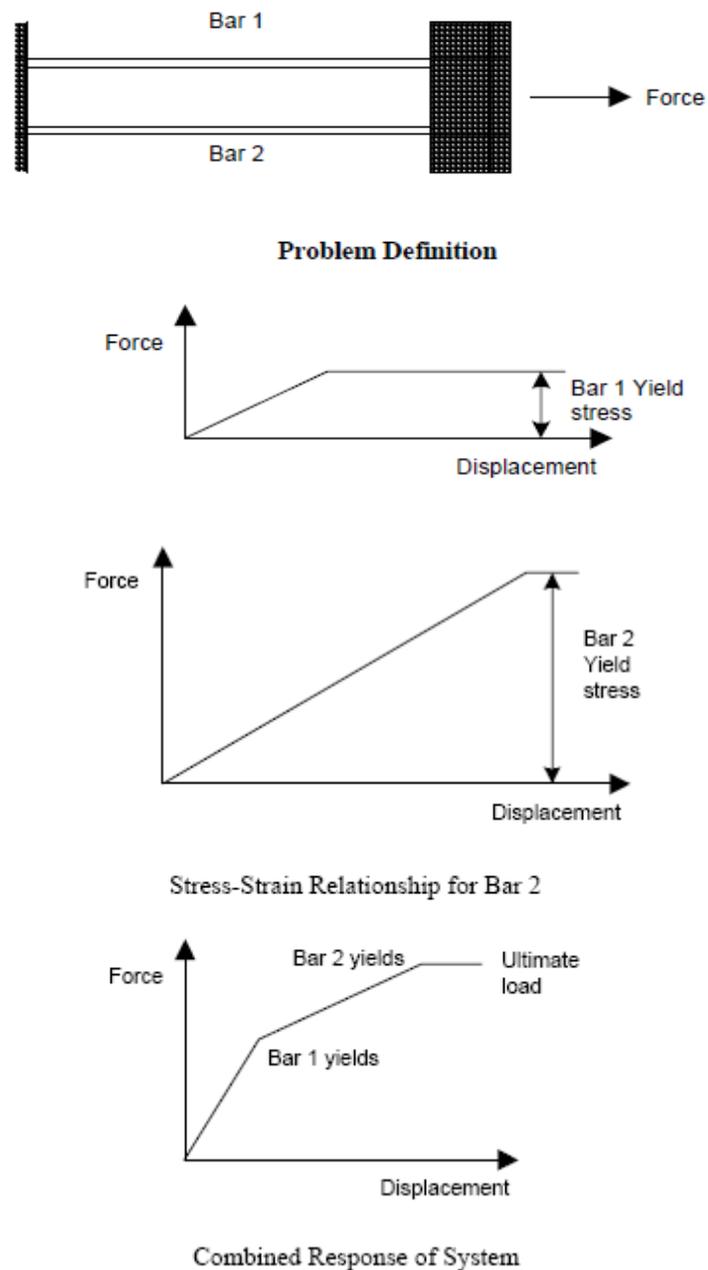
Jenis analisis ini harus dapat digunakan jika hubungan tegangan-regangan material benar-benar non linear. Sebagai contoh idealisasi hubungan tegangan-regangan untuk baja batangan seperti gambar 2.7.



Gambar 2.7 Tegangan regangan untuk baja batangan

Gambar 2.7 menunjukkan linear pada batas elastis dimana analisis elastis dapat memperkirakan konfigurasi deformasi yang akurat bila batas tegangan leleh tidak dilampaui. Jika leleh terjadi diikuti dengan menurunnya kekakuan baja masih dapat mengikuti aturan tegangan-regangan. Oleh karena itu peningkatan beban masih dapat

dijinkan untuk menggambarkan respon semua material. Gambar 2.8 adalah contoh sederhana penggabungan dua material baja.

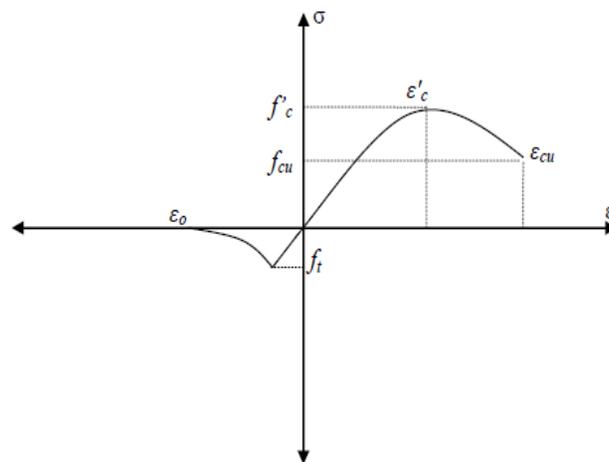


Gambar 2.8 Contoh sederhana penggabungan dua material baja.

Pemodelan material beton (*concrete model*) pada FEM LUSAS menggunakan model yang dikembangkan oleh Jefferson, (1989) untuk model dengan multi crack.

Model ini memperhitungkan retak akibat tarikan dan kegagalan beton akibat desak. Pada kurva tekan beton, puncak parabola menunjukkan tegangan tekan maksimum f'_c yang terjadi saat regangan tekan beton mencapai ϵ'_c dan bagian menurun berupa kurva regangan maksimum ϵ_{cu} , terjadi ketika tegangan maksimum beton f'_{cu} tercapai. Pada kurva tarik beton puncak parabola menunjukkan besarnya tegangan maksimum tarik beton f'_t dan bagian menurun berupa kurva regangan ϵ_o , terjadi ketika tegangan tarik beton maksimum tercapai. Pada Program FEM LUSAS didefinisikan sebagai *concrete (model 94)*. Model material beton pada FEM LUSAS dapat digunakan untuk memodelkan 2-D (dua dimensi) atau 3-D (tiga dimensi).

Hubungan tegangan-regangan material beton ditunjukkan pada Gambar 2.9. Default FEM LUSAS menyediakan formulasi kurva tegangan-regangan material beton, namun kontrol kurva masih tetap diperlukan sebagai input data.



Gambar 2.9. Perilaku hubungan tegangan – regangan material beton

B. Software Analisis Finite Elemen LUSAS

Analisis *finite elemen* secara lengkap terdiri dari 3 (tiga) langkah, yaitu: *pre-processing*, *finite element solver* dan *result processing*. Sistem pada program *finite elemen* LUSAS, mengandung dua bagian pelaksanaan analisis *finite elemen* secara lengkap yaitu:

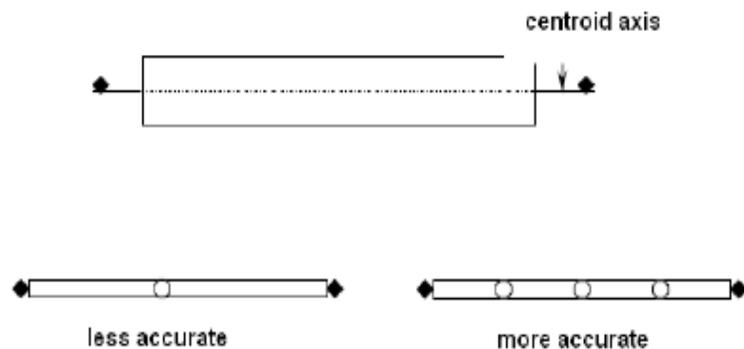
1. LUSAS Modeller, sangat interaktif bagi pengguna dalam pemodelan grafis sebelum dan sesudah proses.
2. LUSAS Solver, untuk melaksanakan Analisis Finite Elemen.

Memodel struktur dilaksanakan pada tahap pra-proses. Model disajikan dalam bentuk grafis dengan dua bagian besar yaitu fitur geometri dan *assign attribute*. Terdapat empat fitur geometri pada LUSAS yaitu titik, garis, bidang dan volume. Dasar penggambaran geometri adalah beberapa titik yang dihubungkan menjadi garis; garis dengan garis yang berhubungan menjadi bidang dan kombinasi beberapa bidang menjadi volume. Seluruh geometri harus dipastikan menurut sistim sumbu cartesian demikian juga untuk sistim sumbu lokal dan sistim sumbu global.

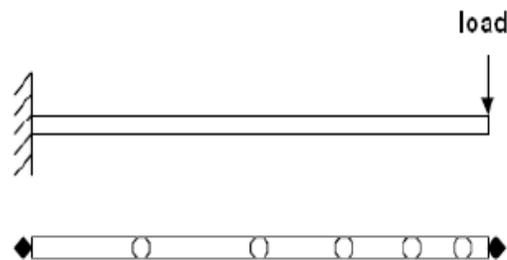
Berikutnya adalah tahap solusi yang dikenal sebagai *finite element solver*. Metode kekakuan akan diproses pada tahap ini dan menghasilkan file data yang diperlukan. Tahap akhir adalah proses hasil dengan melibatkan penggunaan perangkat untuk melihat dan menganalisis jawaban yang dihasilkan oleh LUSAS Solver. LUSAS memiliki beberapa model material yang berbeda dengan variasi cara pemodelan fisik material yang diijinkan termasuk baja elastis, beton, busa dan tanah.

1. Element 1-dimensi

Elemen 1-dimensi hanya digunakan jika perpindahan atau temperatur mempunyai fungsi untuk satu koordinat saja. Jenis elemen ini harus mempunyai sekurang-kurangnya dua titik dalam sumbu kontroidalnya. Elemen ini dapat mempunyai 2 titik, 3 titik, 4 titik dan seterusnya, semakin banyak titik akan memberikan hasil dengan akurasi yang lebih tinggi, tetapi pada saat yang sama membutuhkan kalkulasi yang lebih kompleks. Contoh elemen 1-dimensi adalah elemen *linear quadratic* dan elemen kubik. Gambar 2.10 menunjukkan elemen 1 dimensi dan gambar 2.11 menunjukkan penambahan beban yang bekerja pada model kantilever yang menggunakan elemen 1-dimensi.



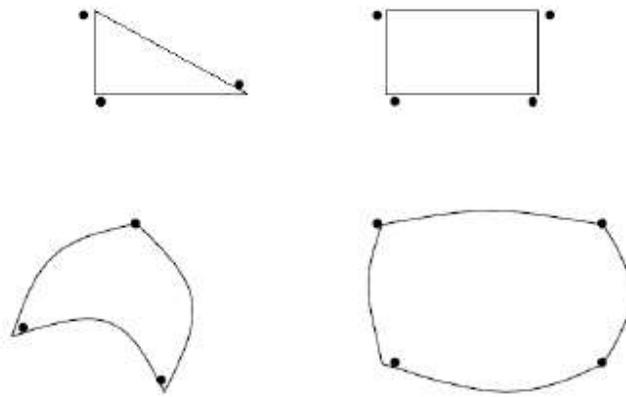
Gambar 2.10 Elemen 1 – dimensi



Gambar 2.11 Penambahan beban yang bekerja pada model kantilever yang menggunakan elemen 1 – dimensi

2. Elemen 2-dimensi

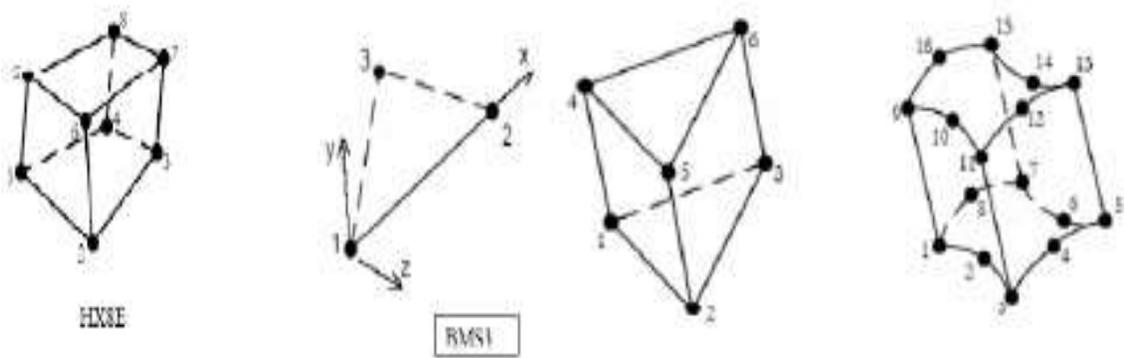
Elemen 2-dimensi digunakan jika perpindahan atau temperatur mempunyai fungsi untuk dua kordinat x dan y . Jenis elemen ini merupakan layer yang mempunyai tiga titik penghubung atau lebih. Contoh untuk elemen 2-dimensi adalah elemen linear triangular, yang paling mudah untuk dimodel, elemen linear rectangular, elemen kurva triangular dan elemen kurva rectangular.



Gambar 2.12 Elemen 2 dimensi

3. Elemen 3-dimensi

Elemen 3-dimensi digunakan jika perpindahan atau temperatur mempunyai fungsi untuk tiga kordinat x , y dan z . Masing-masing panjang tepi sangat menentukan sebab tidak terdapat dimensi elemen yang lebih besar dari 2-dimensi lainnya. Elemen 3-dimensi paling banyak diterapkan sampai saat ini sehubungan dengan tingkat akurasinya. Gambar 2.13 menunjukkan beberapa variasi elemen 3-dimensi.

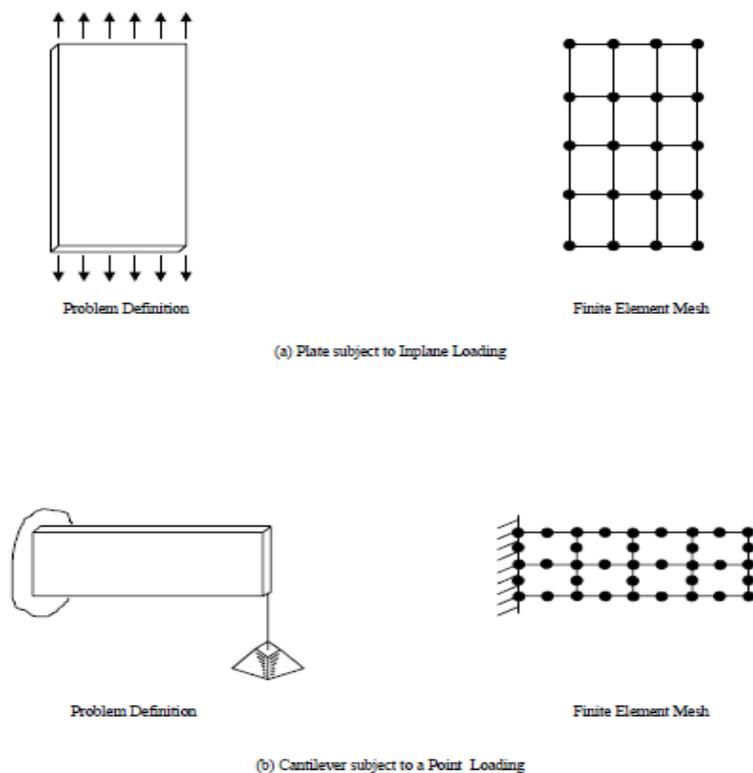


Gambar 2.13 Beberapa variasi elemen 3 dimensi

2.2.2.3 Kesatuan Elemen 2 Dimensi

A. *Plane stress* (QPM4, QPM8, TPM3, TPM6, QPK8, TPK6)

Unsur-unsur *plane stress* cocok untuk menganalisis struktur balok beton dan pelat tipis seperti pada gambar 2.14.



Gambar 2. 14. Contoh ilustrasi menggunakan tipe struktur Plane Stress

B. Evaluasi Tegangan (*Evaluation of stresses*)

Output elemen diperoleh pada node elemen dan Gauss poin yang terdiri dari

- ***Stress Output***

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}, \sigma_z$ adalah tegangan langsung dan geser

$\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ adalah tegangan maksimum dan minimum

β adalah sudut antara tegangan utama maksimum dan sumbu X positif

σ_s adalah tegangan geser maksimum

σ_v adalah tegangan von Mises ekuivalen.

- ***Strain Output***

$\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{XY}, \epsilon_z$ adalah strain langsung dan geser

$\epsilon_{\max}, \epsilon_{\min}$ adalah strain maksimum dan minimum

β adalah sudut antara strain maksimum dan sumbu X positif.

ϵ_s adalah strain geser maksimum.

ϵ_v adalah strain von Mises ekuivalen.

Tegangan yang dihasilkan memperhitungkan ketebalan elemen, tersedia sebagai alternatif tegangan output untuk elemen *plane stress*.

- ***Stress Resultant Output***

N_x, N_y, N_{xy}, N_z adalah tegangan regangan langsung dan resultan/ satuan panjang.

N_{\max}, N_{\min} adalah resultant tegangan minimum dan maksimum/ satuan panjang

β adalah sudut antara resultant tegangan maksimum dan sumbu X positif.

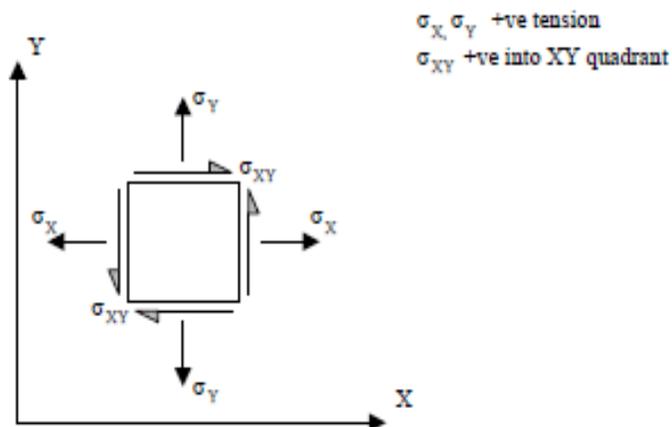
N_s adalah tegangan geser resultan / unit panjang maksimum

N_v adalah von Mises setara resultan / satuan panjang

Tanda konvensi untuk tegangan, resultan tegangan dan output regangan dapat ditunjukkan pada gambar 2.15.

Elemen *isoparametric* elements dapat digunakan dalam :

- Analisis material nonlinear dan model beton. Untuk model beton dapat digunakan elemen *plane stress*.
- Analisis geometris nonlinier.
- Analisis geometri dan material nonlinear menggunakan hukum nonlinear material.
- Dinamika nonlinear memanfaatkan hukum material nonlinier
- Linear eigen-tekuk analisis.



Gambar 2.15 Tegangan bidang pada sumbu x dan y.

2.2.2.4 Model Material Plastic – Isotropic.

Berikut ini adalah model Isotropic yang tersedia dari **Atribut>Material>Isotropic** menu dengan mencentang **Plastic** pada atribut materi kotak dialog.

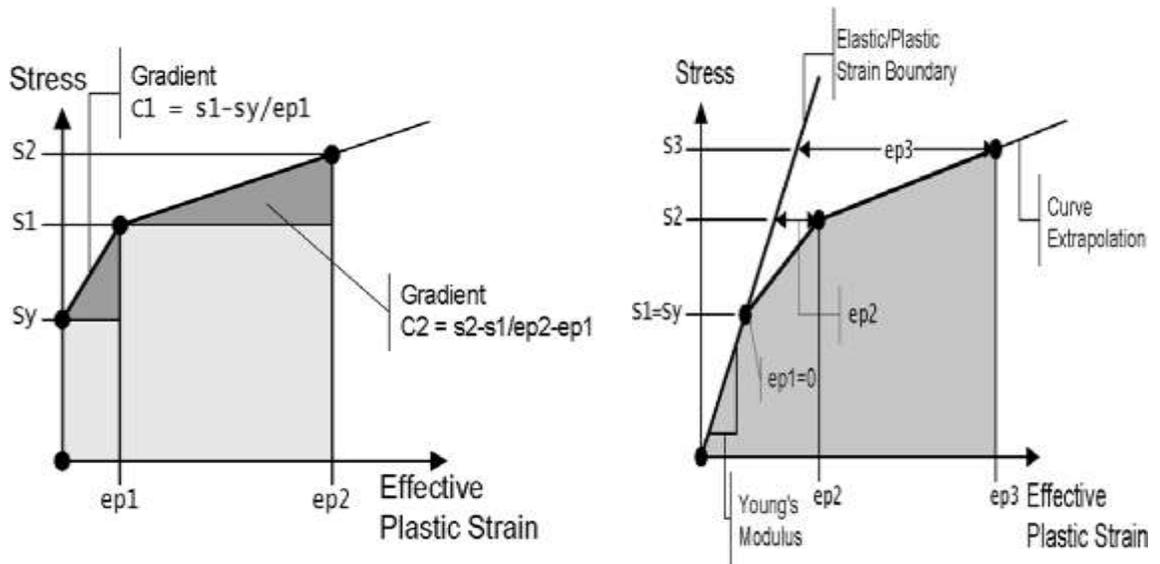
- **Stress Potensial (von Mises)** sifat material nonlinier berlaku untuk multi-aksial tegangan yang membutuhkan spesifikasi tegangan hasil dalam setiap arah dari ruang tegangan. Menggabungkan *hardening*, *yield stress* dan *heat friction*.
- **Optimised von Mises (Model 75)** merupakan perilaku daktail bahan yang menunjukkan volumetric strain (misalnya, logam)
- **Tresca (Model 61)** merupakan perilaku daktail bahan yang memperlihatkan regangan volumetrik (misalnya, logam). Menggabungkan *isotropic hardening*.
- **Mohr-Coulomb (Model 65)** tidak terkait dengan Mohr Coulomb Model merupakan bahan friksional yang memperlihatkan peningkatan kekuatan geser dengan meningkatnya tegangan yang membatasi (misalnya, bahan granular seperti batu dan tanah). Model ini menggabungkan *isotropik hardening* dan *dilatancy*.
- **Drucker-Prager (Model 64)** merupakan perilaku daktailt bahan yang menunjukkan regangan plastik volumetrik (misalnya bahan granular seperti beton, batu dan tanah). Menggabungkan *isotropic hardening*.

- **Concrete (Model 94)** untuk pemodelan 2 dan 3 dimensi dengan memperhitungkan perilaku nonlinear dan mampu memodelkan retak yang terjadi.
- **Stress Resultan (Model 29)** dapat digunakan untuk balok. Model diformulasikan langsung dengan balok atau *shell stress resultants* ditambah sifat geometric.

Dalam penelitian ini pemodelan yang akan digunakan adalah Von Mises Criteria. Von Mises Criteria adalah kriteria hasil yang paling diterima secara universal untuk logam. Kriteria ini didasarkan pada pertimbangan energi regangan . Model Von Mises didefinisikan sebagai *stress potential* model dengan input data terdiri dari :

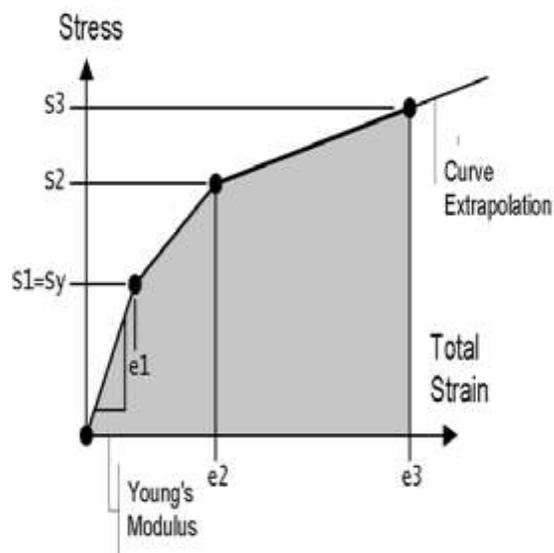
- Material properties : E (*Young's modulus*), ν (*Poisson ratio*), f_y (*Yield Stress*) dan *heat friction*.
- Hardening properties, yang secara default FEA LUSAS menyediakan tiga metode untuk mendefinisikan nonlinear hardening yaitu : *hardening gradient*, *plastic gradient* dan *total strain*.

Ada tiga metode untuk menentukan nonlinier *hardening*. Kurva *hardening* dapat didefinisikan dari segi baik gradien pengerasan, strain plastik atau regangan total seperti pada gambar 2.16.



a. Hardening Gradient

b. Plastic Strain



c. Total Strain

Gambar 2. 16 Kurva Hardeing (Hardening Curve)

(Sumber : FEA LUSAS)

2.2.2.5 Joint element Meshes

Joint elemen digunakan untuk menghubungkan dua atau lebih node/simpul oleh *spring*. *Interface* element digunakan untuk memodelkan *interface* delaminasi

dalam bahan komposit. Untuk *joint* dan *interface* elements dimasukkan diantara node yang sesuai dan fitur dengan menggunakan *interface meshes*. *Joint element* didefinisikan sebagai *Line* atau *Surface*. Dalam analisis 2D, *line joint mesh* ditetapkan untuk fitur *Line* dan dalam analisis 3D *Surface joint mesh* ditetapkan ke fitur *Surface*.

Untuk menetapkan data *joint mesh* dapat digunakan dua cara yaitu :

- a. *Single Joint (Lines only)*. Dalam metode ini *joint meshes* ditetapkan langsung ke *Single Line*. Metode ini lebih cocok untuk mendefinisikan satu atau dua *joint* dimana fitur *line* harus didefinisikan untuk setiap *joint* yang diperlukan.
- b. *Joint Mesh Interface (Lines and Surface)* menggunakan *master* dan *slave* untuk mengikat dua *line* atau dua *surface* secara bersamaan dengan *joint mesh*. Ketika menggunakan *interface meshing joint properties* harus didefinisikan per satuan panjang jika ditetapkan sebagai *line* dan persatuan luas jika ditetapkan sebagai *surface*.

Untuk memodelkan *single joint element* tunggal antara dua titik dapat dilakukan dengan

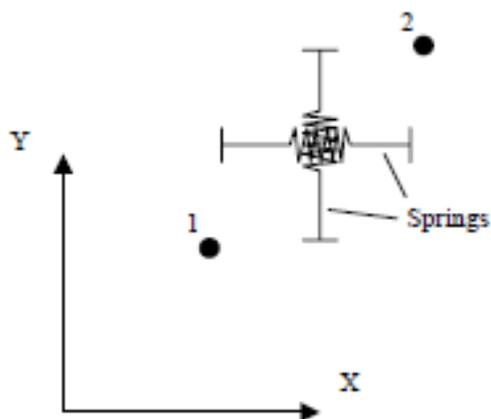
1. Membuat *line* yang menghubungkan 2 titik
2. Menentukan dataset *joint element* dengan memilih *joint element*.
3. Menetapkan *line mesh* ke *line* antara 2 titik.

Untuk memodelkan *joint mesh interface* dapat dilakukan sebagai berikut.

1. Menambahkan fitur *slave* pada memory seleksi
2. Memilih fitur master
3. Menetapkan *joint mesh*.

Material *joint* dapat menghubungkan *joint* elemen untuk mendefinisikan sifat material untuk *joint* model linear dan nonlinear. Terdapat enam model *joint* yang disediakan dalam LUSAS 14.0 yaitu:

1. Model Joint Linear yang terdiri dari :
 - a. *Spring Stiffnes Only*, yang dapat digunakan untuk setiap *local freedom*.
 - b. *General properties* adalah sifat gabungan penuh dari *spring stiffness, mass, coefficient of linear expansion and damping factor*
2. Model Joint Nonlinear, yang terdiri dari :
 - a. *Elasto – Plasto Uniform tension and compression* dengan *isotropic hardening*.
 - b. *Elasto – Plastic General* dengan *isotropic hardening*, dimana tegangan leleh diasumsikan.
 - c. *Smooth Contact* dengan sebuah initial gap
 - d. *Frictional Contact* dengan sebuah initial gap.



Gambar 2.17 Springs yang menghubungkan dua node dalam 2-D (Tanpa Kekakuan rotasi)