



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH ELEMEN DAN JUMLAH NODAL PADA
PEMODELAN UJI TARIK PELAT ISOTROPIK DENGAN
PEMBEBANAN UNI-AKSIAL MENGGUNAKAN METODE
ELEMEN HINGGA**

SKRIPSI

DAVID FERDIYANTO

0706268373

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH ELEMEN DAN JUMLAH NODAL PADA
PEMODELAN UJI TARIK PELAT ISOTROPIK DENGAN
PEMBEBANAN UNI-AKSIAL MENGGUNAKAN METODE
ELEMEN HINGGA**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik**

DAVID FERDIYANTO

0706268373

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

JUNI 2011

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : David Ferdiyanto

NPM : 0706268373

Tanda Tangan : 

Tanggal : 11 Juli 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : David Ferdiyanto
NPM : 0706268373
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Elemen dan Jumlah Nodal pada
Pemodelan Uji Tarik Pelat Isotropik dengan
Pembebanan Uni-Aksial Menggunakan Metode
Elemen Hingga.

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Rini Riastuti, M.Sc

(*Rini Riastuti*)

Penguji : Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA

(*Dedi Priadi*)

Penguji : Dr. Ir. Sutopo, M.Sc

(*Sutopo*)

Penguji : Dr. Roziq Himawan, M.Eng

(*Roziq Himawan*)

Penguji : Farabirazy Albiruni, M.Sc. Mech. Eng

(*Farabirazy Albiruni*)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya ucapkan kepada Allah SWT, karena atas berkat rahmat, taufik, dan hidayah-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini sangatlah sulit bagi saya untuk dapat menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua dan keluarga tercinta yang senantiasa mendoakan saya serta memberikan dukungan moral maupun materil.
2. Ir. Rini Riastuti, M.Sc, selaku pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam melakukan penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Farabirazy Albiruni, Msc. Mech. Eng yang telah membimbing, membantu dan memberikan ilmu yang sangat-sangat berharga bagi saya.
4. Bapak Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA dan Bapak Dr. Ir Sutopo, M.Sc selaku dewan penguji.
5. Bapak Prof. Dr. –Ing. Bambang Suharno Kepala Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI.
6. Seluruh Dosen dan Staf Pengajar Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan yang sangat bermanfaat.
7. Bapak Dr. Ir. Roziq Himawan, M.Eng dan Bapak Anni Rahmat, S.T Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) yang telah membantu dan memberikan pengarahan dalam penelitian ini.
8. Bapak Dr. Ir. Amoranto, M.Sc Kepala Laboratorium Ultrasonik Teknik Fisika Institut Teknologi Bandung.
9. Bang Mamat, Pak Nudin, Pak Suyoto, Pak Eko, Pak Min, dan seluruh karyawan, staf, serta teknisi Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

10. Hasbi Fahada selaku rekan seperjuangan yang telah banyak membantu saya dalam penelitian ini. *“terima kasih banyak pren atas bantuannya. Semoga apa yang kita kerjakan dapat berbuah manis suatu hari nanti.... Amin”*
11. Pasukan TIDAR: Lendi Trigondo, Umar Sidik, Bastian Megantoro, Adhi Nugroho, dan Andika Amanatilah. *“ sukses buat semuanya.... semoga apa yang kita lakukan di tidar menjadi sebuah kenangan manis dan kisah klasik untuk masa depan yang takan pernah dilupakan.”*
12. Para penghuni PONDOK LAMBANG: Arya Pradipta, Halwan Jaya, dan Benny Yarlis Saputra, terima kasih atas tumpiangannya selama saya melakukan penelitian.
13. Seluruh sahabat dan teman-teman Teknik Metalurgi dan Material 2007 yang telah membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.
14. Semua pihak yang telah membantu penyelesaian skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi semua pihak dalam pengembangan ilmu.

Depok, 11 Juli 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : David Ferdiyanto
NPM : 0706268373
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Pengaruh Elemen dan Jumlah Nodal pada Pemodelan Uji Tarik Pelat Isotropik
dengan Pembebanan Uni-Aksial Menggunakan Metode Elemen Hingga

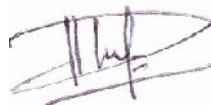
Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 11 Juli 2011

Yang Menyatakan



(David Ferdiyanto)

ABSTRAK

Nama : David Ferdianto
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Elemen dan Jumlah Nodal pada Pemodelan Uji Tarik Pelat Isotropik dengan Pembebanan Uni-Aksial Menggunakan Metode Elemen Hingga

Pengujian tarik masih banyak dilakukan dengan metode eksperimental yang memerlukan waktu dan biaya yang tidak sedikit. Namun, hal itu dapat diatasi dengan menggunakan pendekatan numerik dimana pengujian tarik disimulasikan kedalam suatu komputer dengan menggunakan metode elemen hingga. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh elemen dan jumlah nodal pada pemodelan uji tarik pelat isotropik dengan pembebanan uni-aksial. Elemen yang digunakan ialah elemen 4 titik dengan jumlah nodal 196 dan 676 dan elemen 8 titik dengan jumlah nodal 560 dan 1976. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah nodal maka hasil pemodelan akan semakin akurat. Hasil yang didapatkan ialah pemodelan dengan menggunakan elemen 8 titik dan jumlah nodal 1976 memberikan hasil yang akurat dengan persentase kesalahan 1,37 %

Kata Kunci: Uji Tarik, Metode Elemen Hingga, Elemen, Nodal.

ABSTRACT

Name : David Ferdiyanto
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Title : Effect of Element and Number of Nodes in Modeling
Tensile Test of Isotropic Plate with Uni-axial Loading
Using Finite Element Method

Tensile test was mostly done by experimental methods that require much times and costs. However, it can be solved by using a numerical approach in which the tensile test is simulated into a computer using the finite element method. This research aims to know effect of element and number of nodes in modeling tensile test of isotropic plate with uni-axial loading. Element used in this research is 4-nodes element with 196 and 676 number of nodes and 8-nodes element with 560 and 1976 number of nodes. The modeling results indicate that the more number of nodes then the modeling results will be more accurate. The results of this modeling is a modeling using 8-nodes element with 1976 number of nodes give an accurate result with a percentage of error 1.37%.

Keywords: Tensile Test, Finite Element Method, Element, Nodes.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Penelitian.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan	3
1.4. Ruang Lingkup.....	3
1.4.1. Material	3
1.4.2. Parameter Penelitian	3
1.4.3. Batasan Masalah	3
1.5. Sistematika Penulisan	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Pengujian Tarik	5
2.1.1. Perilaku Mekanik Material	5
2.2. Metode Elemen Hingga.....	11
2.3. <i>Weighted Residual Formulation</i>	13
2.4. Metode Galerkin.....	14
2.5. Pengertian Elemen dan <i>Node</i> pada Metode Elemen Hingga	17
2.5.1. Elemen PLANE42	17
2.5.2. Elemen PLANE82	18

2.6. Material Isotropik	19
2.7. Hubungan Tegangan-Regangan (<i>Constitutive Equation</i>).....	19
2.8. Kondisi <i>Plane Stress</i>	20
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	25
3.2. Diagram Alir Pemodelan	26
3.3. Alat dan Bahan.....	27
3.3.1. Alat	27
3.3.2. Bahan	27
3.4. Prosedur Penelitian.....	27
3.4.1. Pemodelan dengan Menggunakan ANSYS 11.0	27
3.4.2. Preparasi Sampel Uji Tarik	28
3.4.3. Uji Tarik	30
3.5. Validasi	31
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	32
4.1. Pemodelan	32
4.2. Hasil Penelitian.....	34
4.2.1. Hasil Uji Tarik Aktual	34
4.2.2. Hasil Pemodelan.....	35
4.3. Validasi dan Persentase Kesalahan.....	41
BAB 5. KESIMPULAN.....	44
REFERENSI.....	45

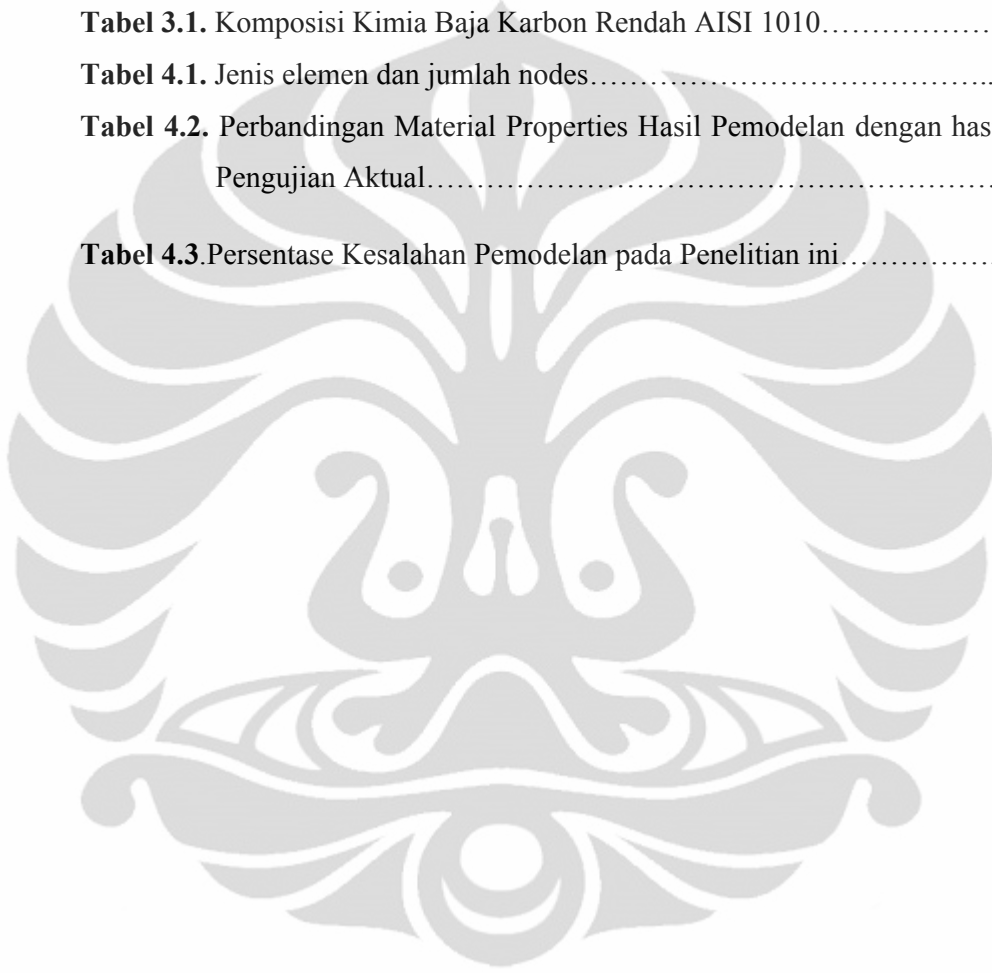
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Kurva Tegangan-Regangan dari sebuah benda uji yang terbuat dari baja ulet	5
Gambar2.2. Gambaran Skema Perhitungan Modulus Kelentingan berdasarkan Kurva Tegangan-Regangan.....	7
Gambar2.3. Kurva Tegangan-Regangan Benda Getas dan Fenomena <i>Upper Lower Yield Point</i>	8
Gambar2.4. Perbandingan antara Kurva Tegangan-Regangan Rekayasa dengan Sesungguhnya	10
Gambar2.5. Material Batangan dengan Beban Aksial	14
Gambar2.6. Pembagian Material Batangan Kedalam Elemen dan Node	15
Gambar2.7. Geometri PLANE42	18
Gambar2.8. Geometri PLANE82	18
Gambar2.9. Komponen Tegangan-Regangan pada tiap titik.....	19
Gambar2.10. Komponen Tegangan-Regangan pada tiap titik kondisi <i>plane stress</i>	21
Gambar3.1. Diagram alir penelitian	25
Gambar3.2. Diagram Alir Pemodelan Uji Tarik pada ANSYS 11.0.....	26
Gambar3.3. Bentuk dan Geometri Sampel Uji Tarik.....	28
Gambar3.4. Bentuk Sampel Uji Tarik	29
Gambar3.5. Pengujian Tarik Sampel	30
Gambar4.1. Bentuk geometri pemodelan separuh <i>gage length</i> pada ANSYS 11.0 yang telah terbagi menjadi elemen dengan proses <i>meshing</i>	32
Gambar 4.2. <i>Boundary Condition</i> pemodelan uji tarik pada ANSYS 11.0....	34
Gambar4.3. Kurva Tegangan-Regangan <i>Engineering</i> Hasil Uji Tarik Sampel Baja Karbon Rendah AISI 1010.....	35
Gambar 4.4. Perbandingan Kurva Tegangan-Regangan <i>Engineering</i> Hasil Pemodelan dengan PLANE 82 terhadap Hasil Uji Tarik Aktual Sampel Baja Karbon Rendah AISI 1010.....	36

Gambar4.5. Perbandingan Kurva Tegangan-Regangan <i>Engineering</i> Hasil Pemodelan dengan PLANE 42 terhadap Hasil Uji Tarik Aktual Sampel Baja Karbon Rendah AISI 1010.....	36
Gambar4.6 Bentuk Deformasi Hasil Pemodelan menggunakan PLANE 82 dengan 1976 nodes.....	39
Gambar4.7. Distribusi Tegangan Von Mises Hasil Pemodelan menggunakan Elemen PLANE 82 dengan 1976 node.....	39
Gambar4.8. Distribusi Tegangan Von Mises Hasil Pemodelan menggunakan Elemen PLANE 82 dengan 560 node.....	40
Gambar4.9. Distribusi Tegangan Von Mises Hasil Pemodelan menggunakan Elemen PLANE 42 dengan 196 node.....	40
Gambar4.10. Distribusi Tegangan Von Mises Hasil Pemodelan menggunakan Elemen PLANE 42 dengan 676 node.....	41
Gambar 4.11 Bentuk Geometri dan <i>Boundary Condition</i> pada Pemodelan Seperempat <i>Gauge Length</i>	42

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Komposisi Kimia Baja Karbon Rendah AISI 1010.....	29
Tabel 4.1. Jenis elemen dan jumlah nodes.....	33
Tabel 4.2. Perbandingan Material Properties Hasil Pemodelan dengan hasil Pengujian Aktual.....	37
Tabel 4.3. Persentase Kesalahan Pemodelan pada Penelitian ini.....	42

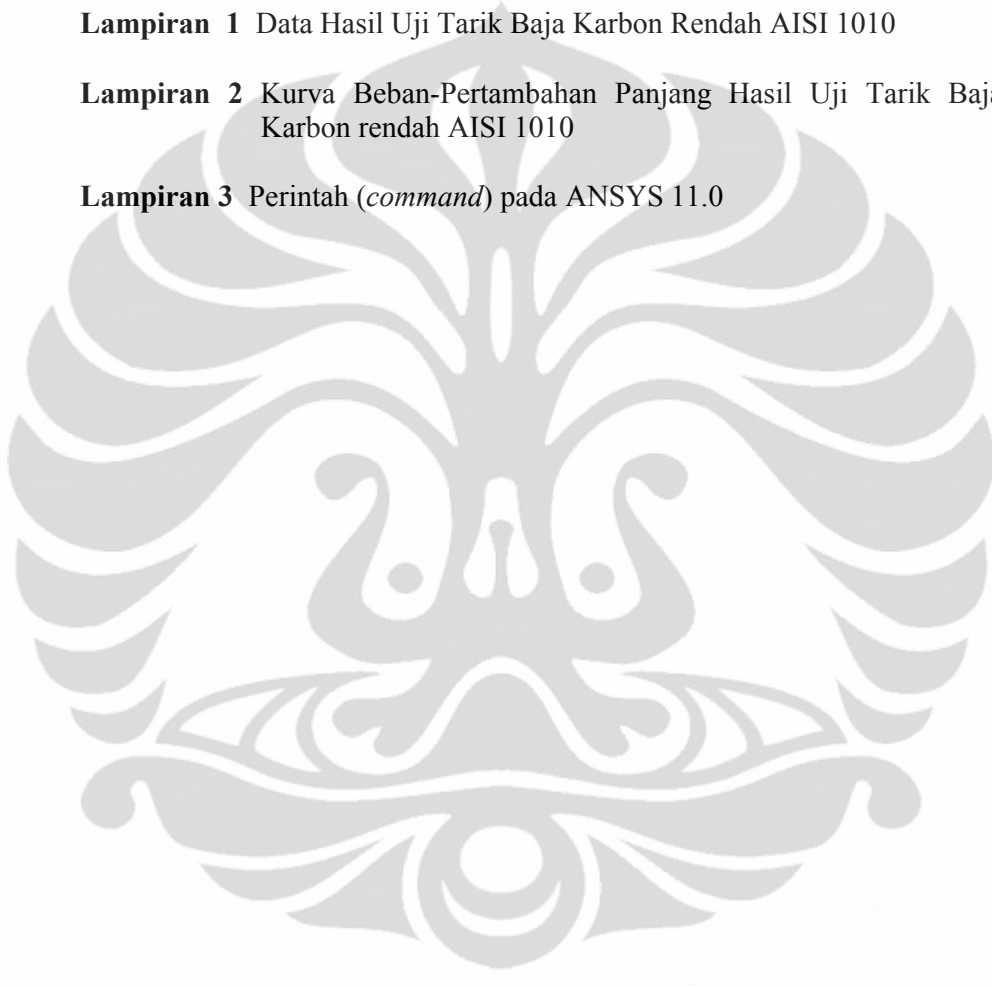


DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Hasil Uji Tarik Baja Karbon Rendah AISI 1010

Lampiran 2 Kurva Beban-Pertambahan Panjang Hasil Uji Tarik Baja Karbon rendah AISI 1010

Lampiran 3 Perintah (*command*) pada ANSYS 11.0



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

Pengujian tarik merupakan salah satu pengujian yang dilakukan untuk mengkarakterisasi atau mengetahui sifat-sifat mekanik dari suatu material. Pada umumnya pengujian ini paling banyak dilakukan karena mampu memberikan informasi representatif dari perilaku mekanik material^[17]. Prinsip dasar dari pengujian ini ialah sampel atau benda uji dengan ukuran dan bentuk tertentu ditarik dengan beban kontinyu sambil diukur pertambahan panjangnya. Data yang didapat berupa pertambahan panjang dan perubahan beban yang selanjutnya ditampilkan dalam bentuk grafik tegangan-regangan. Data-data penting yang diharapkan didapat dari pengujian tarik ini adalah perilaku mekanik material dan karakterisasi perpatahan.

Sejauh ini pengujian tarik dilakukan dengan metode *full experimental* yaitu dengan pengujian skala laboratorium. Dalam melakukan pengujian ini dibutuhkan biaya yang tidak sedikit untuk pembuatan sampel dan juga waktu yang cukup lama untuk melakukan pengujian dan pengolahan data. Oleh karena itu, di lingkungan industri yang menuntut segala sesuatu dilakukan dengan cepat metode ini kurang praktis dan efisien.

Untuk memenuhi tuntutan tersebut, terdapat suatu metode untuk menutupi kekurangan dari metode *full experimental*, yaitu dengan metode pendekatan numerik. Dengan metode pendekatan numerik ini kita dapat mensimulasikan kondisi *full experimental* tersebut kedalam suatu komputer. Selain itu, metode ini juga dapat memberikan data-data yang diperlukan seperti distribusi tegangan dan suhu, tegangan maksimum, serta dapat langsung memberikan kurva tegangan-regangan. Selain itu, dengan metode pendekatan numerik ini kita juga dapat melakukan simulasi pengujian skala laboratorium yang agak sulit dilakukan seperti pengujian *fatigue* dan *creep* hanya dengan membuat pemodelan yang

mendekati dan memasukkan parameter-parameter yang diperlukan, sehingga metode ini lebih praktis dan efisien.

Konsep dasar dari metode numerik ini ialah dengan mendiskrit-kan atau membagi suatu objek kedalam elemen-elemen yang dihubungkan oleh titik-titik (*nodes*). Terdapat dua kelas umum dalam metode numerik, yaitu *finite difference method* dan *finite element method*^[1]. *Finite difference method* menggunakan pendekatan dimana persamaan differensial dituliskan pada setiap titik. Hasil pendekatan ini merupakan satu set persamaan linier yang simultan. Metode ini cukup mudah dipahami dan diterapkan pada kasus sederhana, namun sulit untuk diaplikasikan pada masalah dengan bentuk geometri dan batasan kondisi (*boundary condition*) yang rumit^[1]. Sebaliknya, *Finite element method* menggunakan formulasi integral untuk membuat suatu sistem persamaan aljabar. Selain itu, pendekatan fungsi kontinu diasumsikan untuk mewakili solusi dari tiap-tiap elemen. Solusi keseluruhan kemudian dihasilkan dengan menghubungkan atau menyusun solusi dari tiap-tiap element yang memungkinkan untuk kontinu pada batas antar elemen. Oleh karena itu, *finite element method* banyak digunakan pada metode numerik.

Dari latar belakang tersebut diatas, penulis mencoba melakukan pemodelan pengujian tarik menggunakan elemen hingga dengan bantuan *software* ANSYS 11.0 untuk mengetahui validitas pengujian tarik dengan metode numerik serta pengaruh jumlah *node* (titik) pada hasil pemodelan. Tingkat kesalahan dapat dilihat ketika hasil pemodelan dengan *software* ANSYS ini dibandingkan dengan hasil pengujian yang sebenarnya.

1.2 Perumusan Masalah

Penelitian ini akan membahas mengenai pemodelan pengujian tarik pada struktur pelat isotropik dengan pembebanan uniaxial menggunakan metode elemen hingga dengan menggunakan program ANSYS 11.0.

1.3 Tujuan

Penelitian ini dilakukan dengan maksud untuk mengetahui pengaruh elemen dan jumlah *node* (titik) pada hasil simulasi pemodelan uji tarik dengan menggunakan program ANSYS 11.0

1.4 Ruang Lingkup

1.4.1 Material

Baja karbon rendah AISI 1010 dengan komposisi C 0.08-0.13%, Mn 0.30-0.60%, P 0.04%, S 0.05%.

1.4.2 Parameter Penelitian

Parameter yang digunakan pada penelitian ini ialah jenis elemen dan banyaknya jumlah *node* (titik) yang digunakan pada saat pemodelan.

1.4.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang dipakai dalam penelitian ini adalah:

1. Pemodelan pengujian tarik ini dilakukan hanya setengah bagian *gauge length* karena terdapat kesimetrian geometri, kondisi batas, dan sifat material.
2. Material diasumsikan homogen dan isotropik.
3. Tidak memperhitungkan adanya pengaruh lingkungan seperti korosi dan temperatur diasumsikan temperatur kamar.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika ini dibuat agar konsep penulisan tersusun secara berurutan sehingga didapatkan kerangka alur pemikiran yang mudah dan praktis. Sistematika tersebut digambarkan dalam bentuk bab-bab yang saling berkaitan satu sama lain. Adapun sistematika penulisan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut:

Bab 1 : Pendahuluan

Pada bab ini dibahas mengenai latar belakang dari penelitian yang dilakukan, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan laporan.

Bab 2 : Tinjauan Pustaka

Dalam bab ini dijelaskan tentang studi literatur yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir ini.

Bab 3 : Metodologi Penelitian

Bab ini berisi mengenai langkah kerja, prosedur penelitian, prinsip pengujian, serta daftar bahan dan alat yang digunakan dalam penelitian.

Bab 4 : Hasil dan Pembahasan

Bab ini berisi data-data hasil penelitian dan analisa dari hasil permodelan dengan hasil pengujian sebenarnya.

Bab 5 : Kesimpulan

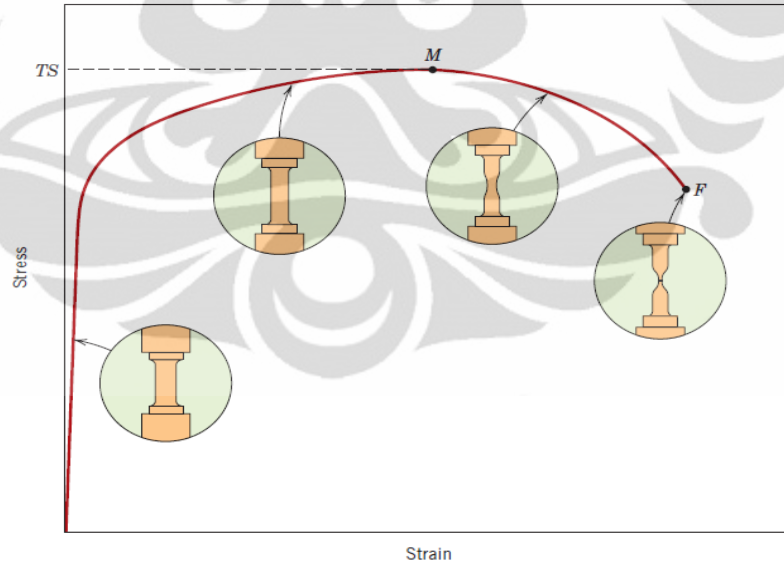
Membahas mengenai kesimpulan akhir berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengujian Tarik

Pengujian tarik merupakan salah satu pengujian yang dilakukan untuk mengkarakterisasi atau mengetahui sifat-sifat mekanik dari suatu material. Pada umumnya pengujian ini paling banyak dilakukan karena mampu memberikan informasi mengenai sifat mekanis material yang sangat diperlukan dalam desain^[5]. Prinsip dasar dari pengujian ini ialah sampel atau benda uji dengan ukuran dan bentuk tertentu ditarik dengan beban kontinyu sambil diukur pertambahan panjangnya. Data yang didapat berupa pertambahan panjang dan perubahan beban yang selanjutnya ditampilkan dalam bentuk grafik tegangan-regangan, sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 2.1. Data-data penting yang diharapkan didapat dari pengujian tarik ini adalah perilaku mekanik material dan karakterisasi perpatahan.



Gambar 2.1. Kurva tegangan-regangan dari sebuah benda uji yang terbuat dari baja ulet^[5]

2.1.1 Perilaku Mekanik Material

Pengujian tarik yang dilakukan pada suatu material padatan (logam dan non logam) dapat memberikan keterangan yang relatif lengkap mengenai perilaku

material tersebut terhadap pembebanan mekanik. Informasi penting yang bisa didapat adalah:

a. Batas Elastis (*elastic limit*)

Daerah elastis adalah daerah dimana bahan akan kembali ke panjang semula bila tegangan luar dihilangkan^[5]. Selanjutnya bila bahan terus diberikan tegangan (deformasi dari luar) maka batas elastis akan terlampaui pada akhirnya sehingga bahan tidak akan kembali kepada ukuran semula. Dengan kata lain, dapat didefinisikan bahwa batas elastis merupakan suatu titik dimana tegangan yang diberikan akan menyebabkan terjadinya deformasi permanen (plastis) pertama kalinya. Kebanyakan material teknik memiliki batas elastis yang hampir berhimpitan dengan batas proporsionalitasnya.

b. Modulus Elastisitas (*E*)

Merupakan ukuran kekakuan suatu material. Semakin besar harga modulus ini maka semakin kecil regangan elastis yang terjadi pada suatu tingkat pembebanan tertentu, atau dapat dikatakan material tersebut semakin kaku (*stiff*). Pada kurva tegangan-regangan modulus elastis ini dapat dihitung dari slope kemiringan garis elastis yang linier, diberikan oleh persamaan:

$$E = \sigma/\varepsilon \text{ atau } E = \tan \alpha \quad (2.1)$$

dimana α adalah sudut yang dibentuk oleh daerah elastis kurva tegangan-regangan. Modulus elastis suatu material ditentukan oleh energi ikat antar atom sehingga besarnya nilai modulus ini tidak dapat dirubah oleh suatu proses tanpa merubah struktur bahan.

c. Modulus Kelentingan (*modulus of resilience*)

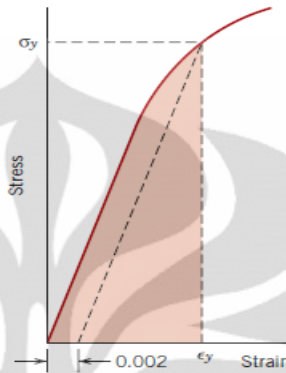
Merupakan kemampuan material untuk menyerap energi dari luar tanpa terjadinya kerusakan^[5]. Nilai dari modulus ini dapat diperoleh dari luas segitiga yang dibentuk oleh area elastis kurva tegangan-regangan pada gambar 2.2 atau dapat dihitung menggunakan persamaan

$$U_r = \int_0^{\varepsilon_y} \sigma d\varepsilon \quad (2.2)$$

Dengan mengasumsikan berada pada daerah linier elastis, maka

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y \quad (2.3)$$

dimana ε_y merupakan regangan pada titik luluh (*yield*)



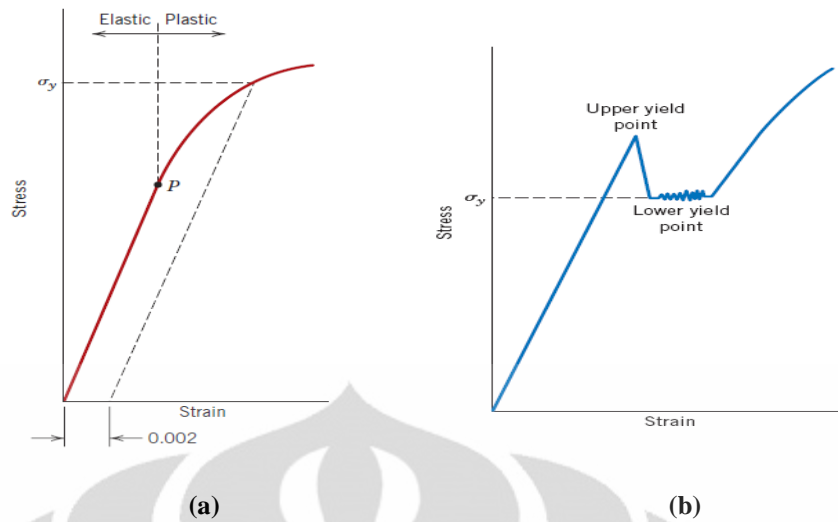
Gambar 2.2. Gambaran Skema Perhitungan Modulus Kelentingan berdasarkan Kurva Tegangan-Regangan^[5]

d. Titik Luluh (*yield point*) dan Tegangan Luluh (*yield stress*)

Merupakan batas dimana sebuah material akan terus mengalami deformasi tanpa adanya penambahan beban^[5]. Tegangan (*stress*) yang mengakibatkan bahan menunjukkan mekanisme luluh ini disebut tegangan luluh (*yield stress*).

Gejala luluh umumnya hanya ditunjukkan oleh logam-logam ulet dengan struktur kristal BCC dan FCC yang membentuk *interstitial solid solution* dari atom-atom karbon, boron, hidrogen dan oksigen^[6]. Interaksi antar dislokasi dan atom-atom tersebut menyebabkan baja ulet seperti *mild steel* menunjukkan titik luluh bawah (*lower yield point*) dan titik luluh atas (*upper yield point*).

Baja berkekuatan tinggi dan besi tuang yang getas pada umumnya tidak memperlihatkan batas luluh yang jelas. Untuk menentukan kekuatan luluh material seperti ini maka digunakan suatu metode yang dikenal dengan metode offset. Dengan metode ini kekuatan luluh ditentukan sebagai tegangan dimana bahan memperlihatkan batas penyimpangan/deviasi tertentu dari keadaan proporsionalitas tegangan dan regangan. Umumnya garis offset diambil 0,1 – 0,2% dari regangan total dimulai dari titik O.



Gambar 2.3. (a) kurva tegangan-regangan dari sebuah benda uji terbuat dari bahan getas (b) fenomena *upper lower yield point*^[5]

Kekuatan luluh atau titik luluh merupakan suatu gambaran kemampuan bahan menahan deformasi permanen bila digunakan dalam penggunaan struktural yang melibatkan pembebanan mekanik seperti tarik, tekan, bending atau puntiran. Di sisi lain, batas luluh ini harus dicapai ataupun dilewati bila bahan (logam) yang dipakai dalam proses manufaktur produk-produk logam seperti proses *rolling*, *drawing*, *stretching* dan sebagainya. Dapat dikatakan titik luluh adalah suatu tingkatan tegangan yang tidak boleh dilewati dalam penggunaan struktural (*in service*) dan harus dilewati dalam proses manufaktur logam (*forming process*).

e. Kekuatan Tarik Maksimum (*ultimate tensile strength*)

Merupakan tegangan maksimum yang dapat ditanggung oleh material sebelum terjadinya perpatahan (*fracture*)^[5]. Nilai kekuatan tarik maksimum (σ_{uts}) ditentukan dari beban maksimum (F_{maks}) dibagi luas penampang awal (A_0). Pada bahan ulet, tegangan maksimum ini ditunjukkan oleh titik M (gambar 2.1) dan selanjutnya bahan akan terus berdeformasi hingga titik F. bahan yang bersifat getas memberikan perilaku yang berbeda dimana tegangan maksimum sekaligus tegangan perpatahan. Dalam kaitannya dengan penggunaan struktural maupun dalam proses pembentukan bahan, kekuatan maksimum adalah batas tegangan yang sama sekali tidak boleh dilewati.

f. Kekuatan Putus (*breaking stress*)

Kekuatan putus ditentukan dengan membagi beban pada saat benda uji putus ($F_{breaking}$) dengan luas penampang awal (A_0). Untuk bahan yang bersifat ulet pada saat beban maksimum terlampaui dan bahan terus terdeformasi hingga titik putus B maka terjadi mekanisme penciutan (*necking*) sebagai akibat adanya suatu deformasi yang terlokalisasi. Pada bahan ulet, kekuatan putus lebih kecil dari kekuatan maksimum, dan pada bahan getas kekuatan putus sama dengan kekuatan maksimumnya.

g. Keuletan (*ductility*)

Merupakan sifat yang menggambarkan kemampuan logam menahan deformasi hingga terjadinya perpatahan^[5]. Sifat ini dalam beberapa tingkatan harus dimiliki oleh bahan bila ingin dibentuk melalui proses *rolling*, *bending*, *drawing*, dan sebagainya. Pengujian tarik memberikan dua metode pengukuran keuletan bahan yaitu :

- **Persentase perpanjangan (*elongation*)**

Diukur sebagai penambahan panjang ukur setelah perpatahan terhadap panjang awalnya.

$$\% \text{ Elongasi } (\epsilon) = [L_f - L_0 / L_0] \times 100\% \quad (2.4)$$

Dimana L_f adalah panjang akhir dan L_0 adalah panjang awal dari benda uji.

- **Persentase reduksi penampang (*area reduction*)**

Diukur sebagai pengurangan luas penampang (*cross section*) setelah perpatahan terhadap luas penampang awalnya.

$$\% \text{ Reduksi penampang } = [A_f - A_0 / A_0] \times 100\% \quad (2.5)$$

Dimana A_f adalah luas penampang akhir dan A_0 adalah luas penampang awal dari benda uji.

h. Modulus Ketangguhan (*modulus of toughness*)

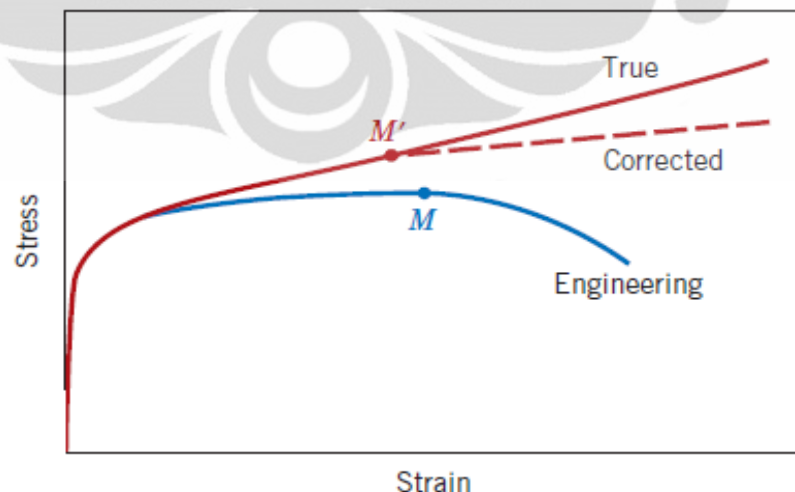
Merupakan kemampuan material dalam menyerap energi hingga terjadinya perpatahan^[5]. Secara kuantitatif dapat ditentukan dari luas area keseluruhan di bawah kurva tegangan-regangan hasil pengujian tarik. Material dengan modulus

ketangguhan yang tinggi akan mengalami distorsi yang besar karena pembebanan berlebih, tetapi hal ini tetap disukai dibandingkan material dengan modulus yang rendah dimana perpatahan akan terjadi tanpa suatu peringatan terlebih dahulu.

i. Kurva tegangan-regangan rekayasa dan sesungguhnya

Kurva tegangan-regangan rekayasa didasarkan atas dimensi awal (luas area dan panjang) dari benda uji, sementara untuk mendapatkan kurva tegangan-regangan sesungguhnya diperlukan luas area dan panjang aktual pada saat pembebanan setiap saat terukur. Perbedaan kedua kurva tidaklah terlalu besar pada regangan yang kecil, tetapi menjadi signifikan pada rentang terjadinya pengerasan regangan (*strain hardening*), yaitu setelah titik luluh terlampaui.

Secara khusus perbedaan menjadi demikian besar di dalam daerah *necking*. Pada kurva tegangan-regangan rekayasa, dapat diketahui bahwa benda uji secara aktual mampu menahan turunnya beban karena luas area awal A_0 bernilai konstan pada saat perhitungan tegangan $\sigma = P/A_0$. Sementara pada kurva tegangan-regangan sesungguhnya luas area aktual adalah selalu turun sehingga terjadinya perpatahan dan benda uji mampu menahan peningkatan tegangan karena $\sigma = P/A$. Untuk regangan sesungguhnya ditentukan dengan $\epsilon = \ln(l_i/l_0)$. Gambar 2.3 dibawah ini memperlihatkan contoh kedua kurva tegangan-regangan rekayasa dan sesungguhnya.



Gambar 2.4 Perbandingan antara kurva tegangan-regangan rekayasa dan sesungguhnya dari baja karbon rendah^[4]

2.2 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan suatu prosedur numerik yang dapat digunakan untuk memecahkan masalah mekanika kontinum. *Steady, transient*, linier, atau permasalahan nonlinear pada analisis tegangan, perpindahan kalor, aliran fluida, dan permasalahan elektromagnetik dimungkinkan dapat dianalisa dengan metode elemen hingga^[1].

Sejarah Metode elemen hingga diawali pada tahun 1906 ketika para ahli riset mengusulkan metode “analogi *lattice*” untuk memecahkan masalah kontinum. Disini kontinum didekati dengan jaringan yang teratur yang berbentuk batang – batang elastis. Pada tahun 1943 Courant mengusulkan interpolasi polinomial bagian demi bagian pada daerah segi tiga sebagai cara untuk mendapatkan solusi pendekatan numerik. Solusi ini lebih dikenal dengan nama Rayleigh – Ritz untuk masalah varisional dan mengantarkan Courant sebagai orang pertama yang mengembangkan metode elemen hingga^[1]. Mulai dari saat itu metode elemen hingga terus berkembang hingga saat ini.

Pada dasarnya elemen hingga merupakan bagian – bagian kecil dari struktur yang aktual akan tetapi dalam pembentukan elemen – elemen tersebut harus memperhatikan *nodal forces* sehingga didapatkan berbagai ragam deformasi elemen^[16]. Hal ini dilakukan agar struktur aktual yang telah ada tidak melemah dan tidak terjadi konsentrasi tegangan pada titik – titik pertemuannya dimana akan cenderung menjadi tumpang tindih atau terpisah disepanjang elemen. Metode elemen hingga ini dapat digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah. Daerah yang dianalisa dapat mempunyai bentuk, beban, dan kondisi batas yang sembarang. Jaringan – jaringannya yang terbentuk dapat terdiri atas elemen yang berbeda jenis, bentuk dan besar fisiknya. Kemudahan berbagai hal ini pada saat ini ada dalam satu program komputer seperti ABAQUS, ANSYS, SAAP, CATIA, NASTRAN, dll.

Keunggulan lainya dari metode elemen hingga adalah jaringan elemen – elemen yang terbentuk sangat dekat dengan struktur aktual yang akan dikaji. Disamping keunggulan metode elemen hingga juga memiliki kelemahan yaitu hasil dari analisa yang ada berupa numerik bukan suatu persamaan bentuk tertutup

yang dapat dipakai dalam memecahkan berbagai kasus, data – data input yang dimasukkan cenderung lebih banyak sehingga data output pun yang disortir oleh program komputer pun lebih banyak. Sebenarnya kelemahan seperti ini tidak hanya terjadi pada metode elemen hingga sehingga hal ini dapat dimaklumi. Adapun tahapan-tahapan dasar dalam metode elemen hingga, meliputi:

Tahap *Preprocessing*

Merupakan tahap awal dalam metode elemen hingga. Pada tahap ini kita merumuskan permasalahan dan mendiskrit-kan permasalahan tersebut, serta menentukan parameter-parameter yang diperlukan. Langkah-langkah pada tahap preprocessing ini antara lain:

1. Membuat dan mendiskrit-kan solusi utama menjadi elemen hingga, yaitu membagi permasalahan tersebut kedalam elemen-elemen dan *nodes*.
2. Mengasumsikan bentuk persamaan untuk menjelaskan perilaku fisik dari element, dimana pendekatan fungsi kontinu dianggap mewakili solusi dari suatu elemen.
3. Mengembangkan persamaan untuk suatu elemen.
4. Menggabungkan elemen-elemen sehingga menyajikan keseluruhan permasalahan dan membuat matriks kekakuan umum.
5. Mengaplikasikan batasan kondisi (*boundary condition*), kondisi awal, dan pembebanan.

Tahap *Penyelesaian*

Pada tahap ini dilakukan penyelesaian dari satu set persamaan aljabar linear maupun non linear secara simultan untuk mendapatkan hasil nodal, seperti nilai perpindahan (*displacement*) pada titik (*node*) yang berbeda atau nilai temperatur pada titik (*node*) yang berbeda untuk permasalahan perpindahan panas.

Tahap *Postprocessing*

Pada tahap ini kita dapat memperoleh hasil-hasil penting lainnya, seperti nilai-nilai tegangan utama, distribusi tegangan, *heat flux* dan distribusi panas untuk permasalahan perpindahan panas, dll.

Secara umum terdapat beberapa pendekatan untuk merumuskan permasalahan elemen hingga (*finite element*), seperti perumusan langsung (*direct formulation*), perumusan jumlah energi potensial minimum (*the minimum total potential energy formulation*), dan *Weighted Residual Formulation*. Pada penelitian ini, perumusan yang digunakan ialah *Weighted Residual Formulation* dengan metode Galerkin^[1,2].

2.3 *Weighted Residual Formulation*

Weighted residual formulation berdasarkan pada asumsi solusi yang mendekati untuk mengatur persamaan differensial. Solusi yang diasumsikan harus memenuhi kondisi awal dan batasan kondisi (*boundary condition*) dari permasalahan yang diberikan. Karena solusi yang diasumsikan belum tentu tepat, maka substitusi solusi kedalam persamaan differensial akan memberikan beberapa nilai error:

$$\begin{cases} L[u(x)] = f(x) & (a \leq x \leq b) \\ \text{BC (Boundary Condition): } u(a) = u_a, u(b) = u_b \end{cases} \quad (2.6)$$

dimana L merupakan operator differensial linear, $f(x)$ fungsi dari x , dan u_a dan u_b nilai dari fungsi $u(x)$ yang diinginkan pada titik akhir atau batas satu dimensi dari wilayah D . Kemudian kita asumsikan solusi yang mendekati untuk fungsi u ialah

$$\bar{u}(x) = \phi_0(x) + \sum_{i=1}^n a_i \phi_i(x) \quad (2.7)$$

dimana ϕ_i disebut fungsi coba-coba ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) yang dipilih secara acak sebagai fungsi $\phi_0(x)$ dan a_i merupakan beberapa parameter yang dihitung sehingga memperoleh hasil yang baik.

Substitusi persamaan (2.7) kedalam persamaan (2.6) akan menghasilkan beberapa nilai error R .

$$L[u(x)] - f(x) = R \quad (2.8)$$

Metode *weighted residual* ini menentukan \bar{u} sehingga integral error R dapat mendekati nol.

$$\int_D w_i R dv = 0 \quad (2.9)$$

2.4 Metode Galerkin

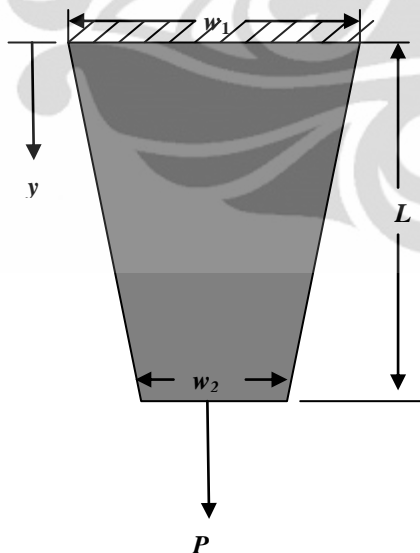
Metode galerkin mengharuskan kesalahan (*error*) menjadi orthogonal untuk beberapa fungsi pembobot Φ , sesuai dengan persamaan integral

$$\int_D \Phi R dv = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.10)$$

Fungsi pembobot dipilih untuk menjadi bagian dari solusi yang mendekati. Metode ini menentukan nilai koefisien a_i secara langsung menggunakan persamaan (2.10) atau dengan mengintegrasikan bagian-bagiannya.

Untuk lebih mudah memahami mengenai *finite element method* ini, mari kita perhatikan contoh kasus berikut^[1]:

Diketahui sebuah material berbentuk batangan (bar) menahan beban sebesar P . material tersebut dimatikan (fixed) salah satu sisinya dan sisi lainnya menahan beban sebesar P seperti ditunjukkan oleh gambar dibawah ini:

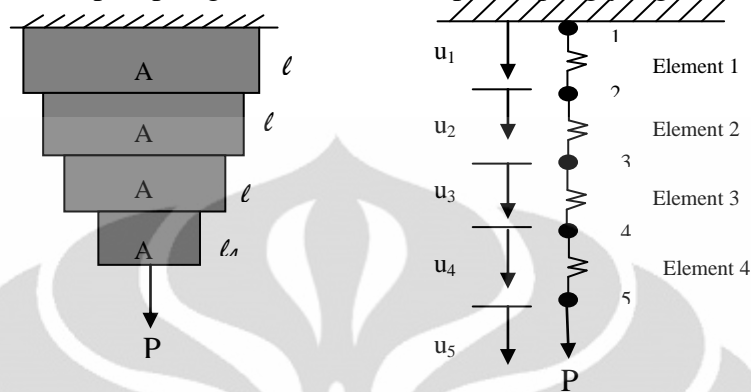


Lebar pada bagian atas (w_1) = 2 inch, lebar bagian bawah (w_2) = 1 inch, ketebalannya (t) = 0.125 inch, panjang keseluruhan (L) = 10 inch, dan beban yang diaplikasikan (P) = 96.154×10^{-6}

Gambar 2.5 material batangan (bar) dengan beban axial

Tahap Preprocessing

1. Mendiskritkan material tersebut dengan membagi menjadi 4 elemen dan 5 titik. Tiap-tiap bagian memiliki luas penampang yang sama besar.



Gambar 2.6 pembagian material batangan (bar) kedalam elemen dan node

2. Menentukan persamaan differensial umum (*governing differential equation*) dan batasan kondisi.

$$A(y)E \frac{du}{dy} - P = 0 \quad (2.11)$$

Boundary conditionnya ialah $u(0) = 0$

3. Mengasumsikan solusi yang mendekati untuk setiap elemen, dimana asumsi tersebut harus memenuhi *boundary condition*. Untuk permasalahan ini solusi yang diasumsikan ialah

$$u(y) = c_1 y + c_2 y^2 + c_3 y^3 \quad (2.12)$$

dimana c_1, c_2 , dan c_3 adalah koefisien yang tidak diketahui. Persamaan (2.12) memenuhi *boundary condition* tetap yang dinyatakan dengan $u(0) = 0$. Substitusi asumsi solusi persamaan (2.12) kedalam *governing differential equation* (2.11) menghasilkan fungsi error, \mathcal{R} :

$$\left(w_1 + \left(\frac{w_2 - w_1}{L} \right) y \right) t E \left(c_1 + 2c_2 y + 3c_3 y^2 \right) - P = \mathcal{R} \quad (2.13)$$

Substitusi nilai w_1 , w_2 , L , t , dan E kedalam persamaan (2.13) diatas sehingga didapatkan

$$\mathcal{R}/E = (0.25 - 0.0125y)(c_1 + 2c_2y + 3c_3y^2) - 96.154 \times 10^{-6}$$

Tahap Penyelesaian

Menggabungkan solusi yang mendekati dari tiap-tiap elemen menjadi suatu sistem persamaan aljabar linear maupun non linear. Asumsi solusi yang mendekati yang telah dirumuskan pada tahap *preprocessing* ialah $u(y) = c_1y + c_2y^2 + c_3y^3$ kemudian *weighting function*-nya menjadi $\Phi_1 = y$, $\Phi_2 = y^2$, dan $\Phi_3 = y^3$. Ketiga fungsi ini memberikan persamaan berikut

$$\begin{aligned} \int_0^L y[(0.25 - 0.0125y)(c_1 + 2c_2y + 3c_3y^2) - 96.154 \times 10^{-6}] dy &= 0 \\ \int_0^L y^2[(0.25 - 0.0125y)(c_1 + 2c_2y + 3c_3y^2) - 96.154 \times 10^{-6}] dy &= 0 \\ \int_0^L y^3[(0.25 - 0.0125y)(c_1 + 2c_2y + 3c_3y^2) - 96.154 \times 10^{-6}] dy &= 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Integrasi dari persamaan (2.14) memberikan hasil tiga persamaan linear yang dapat kita selesaikan untuk menentukan koefisien c_1 , c_2 , dan c_3 yang tidak diketahui:

$$8.333333c_1 + 104.1666667c_2 + 1125c_3 = 0.0048077$$

$$52.083333c_1 + 750c_2 + 8750c_3 = 0.0320513333$$

$$375c_1 + 5833.3333c_2 + 71428.57143c_3 = 0.240385$$

Penyelesaian dari persamaan diatas memberikan nilai $c_1 = 400.642 \times 10^{-6}$, $c_2 = 4.006 \times 10^{-6}$, dan $c_3 = 0.935 \times 10^{-6}$.

Tahap *Postprocessing*

Substitusi nilai koefisien c kedalam persamaan (4.12) akan memberikan perkiraan bentuk perpindahan (*displacement*):

$$u(y) = 400.642 \times 10^{-6}y + 4.006 \times 10^{-6}y^2 + 0.935 \times 10^{-6}y^3 \quad (2.15)$$

Dengan menggunakan persamaan (2.15) kita dapat mengetahui seberapa besar *displacement* yang terjadi pada material tersebut. Pada tahap *postprocessing* ini juga kita dapat mengetahui distribusi tegangan yang terjadi pada material tersebut.

2.5 Pengertian Elemen dan *Node* pada Metode Elemen Hingga

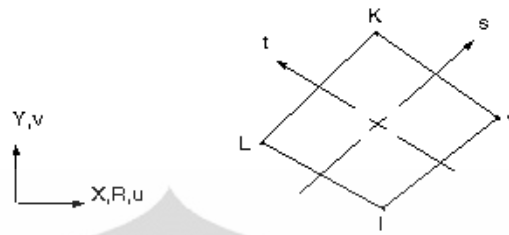
Dalam metode elemen hingga suatu permasalahan didiskritkan kedalam elemen dan *node* dimana elemen merupakan bagian-bagian kecil dari struktur aktual yang terbentuk dari *node* yang dihubungkan satu dengan lainnya. Dalam pemodelan, semakin banyak jumlah elemen dan *node* maka hasil pemodelan tersebut akan semakin akurat^[1,2]. Hal ini dikarenakan perhitungan penyelesaian dilakukan pada tiap-tiap *node* sehingga semakin banyak jumlah *node* maka hasilnya akan semakin akurat, namun dibutuhkan waktu penyelesaian yang lebih lama dan juga membutuhkan kapasitas memori komputer yang cukup besar. Oleh karena itu dalam melakukan suatu pemodelan, pemilihan elemen yang tepat sangat diperlukan agar hasil pemodelan tersebut dapat akurat (menghasilkan tingkat kesalahan yang rendah) dan efektif.

Untuk permasalahan dua dimensi, elemen yang umum digunakan ialah elemen isometris berbentuk persegi (*rectangular*) dan segitiga (*triangular*). Didalam program ANSYS 11.0 terdapat banyak sekali pilihan elemen yang dapat digunakan, namun pada umumnya elemen yang sering digunakan dan juga akan digunakan pada penelitian ini ialah PLANE42 dan PLANE82.

2.5.1 Elemen PLANE42

Merupakan elemen quadrilateral empat titik yang banyak digunakan pada pemodelan permasalahan struktural solid dua dimensi. Elemen ini ditentukan

oleh empat titik (4-nodes) dengan dua derajat kebebasan (*degree of freedom*), perpindahan pada arah x dan y pada tiap-tiap titik.



Gambar 2.7 Geometri Plane42^[7]

Fungsi bentuk perpindahan titik pada elemen ini ditentukan oleh persamaan^[3,7]

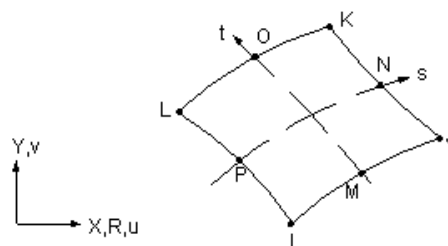
$$u = \frac{1}{4} \left(u_I(1-s)(1-t) + u_J(1+s)(1-t) + u_K(1+s)(1+t) + u_L(1-s)(1+t) \right) \quad (2.16)$$

Fungsi perpindahan titik pada arah-Y sama dengan persamaan (2.16)

Data keluaran yang diperoleh dengan menggunakan elemen ini ialah perpindahan titik (*nodal displacement*) dan data-data elemen seperti arah tegangan dan tegangan-tegangan utama.

2.5.2 Elemen Plane82 Quadrilateral

Merupakan elemen quadrilateral dengan delapan titik (8-node) yang digunakan dalam pemodelan permasalahan struktur dua dimensi. Pada tiap-tiap titik terdapat dua derajat kebebasan (*degree of freedom*) yaitu perpindahan pada arah x dan y. Elemen ini lebih akurat dibandingkan PLANE42 dan dapat digunakan untuk permasalahan non linier.



Gambar 2.8 Geometri Plane82^[7]

Fungsi bentuk perpindahan titik pada elemen ini ditentukan oleh persamaan^[3,7]

$$u = \frac{1}{4} \left(u_I(1-s)(1-t)(-s-t-1) + u_J(1+s)(1-t)(s-t-1) + u_K(1+s)(1+t)(s+t-1) + u_L(1-s)(1+t)(-s+t-1) \right) + \frac{1}{2} \left(u_M(1-s^2)(1-t) + u_N(1+s)(1-t^2) + u_O(1-s^2)(1+t) + u_P(1-s)(1-t^2) \right) \quad (2.17)$$

Fungsi perpindahan titik arah Y sama dengan persamaan (2.17)

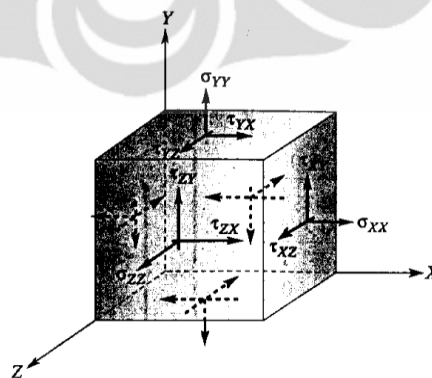
Data keluaran yang diperoleh dengan menggunakan elemen ini ialah perpindahan titik (*nodal displacement*) dan data-data elemen seperti arah tegangan dan tegangan-tegangan utama.

2.6 Material Isotropik

Material *isotropic* merupakan material yang memiliki sifat yang sama dan seragam ke segala arah^[8]. Material ini memiliki nilai dan sifat yang sama baik diarah sumbu-x, sumbu-y, maupun sumbu-z.

2.7 Hubungan Tegangan – Regangan (*Constitutive Equation*)

Hubungan tegangan-regangan menjelaskan mengenai tahapan deformasi dimana regangan dipengaruhi oleh gaya internal atau ketahanan tegangan terhadap beban yang diaplikasikan^[2].



Gambar 2.9 Komponen Tegangan pada tiap titik^[1]

Hubungan tegangan-regangan ini sangat dipengaruhi oleh sifat dari material itu sendiri. Salah satu dari banyak hubungan tegangan- regangan yang terkenal ialah

dengan menggunakan hukum Hook's yang terdiri dari enam komponen tiga dimensi tensor tegangan bersama tensor regangan mengikuti persamaan linear sederhana berikut ini:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} e_\nu + 2G\varepsilon_x \\ \sigma_y = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} e_\nu + 2G\varepsilon_y \\ \sigma_z = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} e_\nu + 2G\varepsilon_z \\ \tau_{xy} = G\gamma_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy} \\ \tau_{yz} = G\gamma_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{yz} \\ \tau_{zx} = G\gamma_{zx} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{zx} \end{array} \right. \quad (2.18)$$

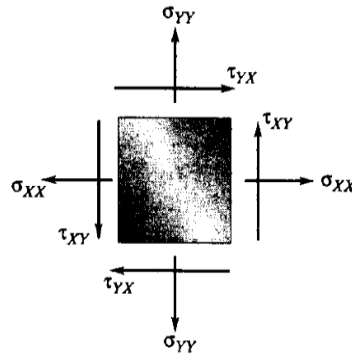
atau kebalikan (*inversnya*)

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu (\sigma_z + \sigma_x)] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)] \\ \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \\ \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \\ \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \end{array} \right. \quad (2.19)$$

dimana E merupakan modulus Young's, ν merupakan poisson's ratio, G modulus geser (*shear modulus*), dan e_ν regangan volumetrik yang didapat dari penjumlahan tiga komponen regangan normal $e_\nu = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$

2.8 Kondisi *Plane Stress*

Untuk pelat yang sangat tipis, dapat diasumsikan menggunakan pendekatan kondisi *plane stress* yaitu suatu kondisi dimana seluruh komponen tegangan pada arah tegak lurus permukaan pelat bernilai nol ($\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{yz} = 0$)^[2].



Gambar 2.10 Komponen Tegangan pada tiap titik kondisi *Plane Stress*^[1]

Hubungan tegangan-regangan pada pendekatan ini dapat dituliskan mengikuti hukum Hook's dua dimensi:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \\ \sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \\ \tau_{xy} = G\gamma_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy} \end{cases} \quad (2.20)$$

atau kebalikan (*inversnya*)

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu\sigma_y) \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu\sigma_x) \\ \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \end{cases} \quad (2.21)$$

Perlu diingat bahwa pada kondisi *plane stress* komponen regangan normal ε_z dalam arah ketebalan tidaklah nol, melainkan

$$\varepsilon_z = -\nu(\sigma_x + \sigma_y)/E \quad (2.22)$$

Empiris metode elemen hingga untuk hubungan tegangan dan regangan pada daerah elastis dijabarkan oleh persamaan^[7]:

$$\sigma = [K][\varepsilon^{el}] \quad (2.23)$$

dimana :

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\nu_{xy} & -\nu_{zx} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & -\nu_{yz} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{zx}}{E_z} & -\nu_{zy} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}} \end{bmatrix}$$

Sehingga didapatkan tegangan untuk tiap perpindahan (distorsi) yaitu :

$$\sigma_x = \frac{E_x}{h} \left[1 - (\nu_{yz})^2 \cdot \frac{E_z}{E_y} \right] (\varepsilon_x) + \frac{E_y}{h} (\nu_{xy}) \nu_{xy} \nu_{zx} \frac{E_z}{h} (\varepsilon_y) + \frac{E_z}{h} (\nu_{zx} + \nu_{yz} \cdot \nu_{xy}) (\varepsilon_z)$$

$$\sigma_y = \frac{E_y}{h} \left[1 - (\nu_{xz})^2 \cdot \frac{E_z}{E_x} \right] (\varepsilon_y) + \nu_{xy} \nu_{zx} \frac{E_x}{h} (\varepsilon_x) + \frac{E_z}{h} (\nu_{yz} + \nu_{zx} \cdot \nu_{xy}) (\varepsilon_z)$$

$$\sigma_z = \frac{E_z}{h} \left[1 - (\nu_{xy})^2 \cdot \frac{E_y}{E_x} \right] (\varepsilon_z) + \frac{E_x}{h} (\nu_{yz} + \nu_{xz} \nu_{xy} \frac{E_y}{E_x}) (\varepsilon_y) + \frac{E_z}{h} (\nu_{zx} + \nu_{yz} \nu_{xy}) (\varepsilon_x)$$

$$\sigma_{xy} = G_{xy} \cdot \varepsilon_{xy}$$

$$\sigma_{yz} = G_{yz} \cdot \varepsilon_{yz}$$

$$\sigma_{zx} = G_{zx} \cdot \varepsilon_{zx}$$

$$h = 1 - (\nu_{xy})^2 \frac{E_y}{E_x} - (\nu_{yz})^2 \frac{E_z}{E_x} - (\nu_{xz})^2 \frac{E_z}{E_x} - 2\nu_{xy} \nu_{yz} \nu_{zx} \frac{E_z}{E_x}$$

Untuk hubungan tegangan-regangan pada daerah plastis, persamaan (2.23) tidak berlaku lagi karena terjadi pengerasan regangan, sehingga bentuk persamaannya menjadi non-linier seperti dijabarkan oleh persamaan^[4]

$$\sigma = \sigma_0 + K \varepsilon^n \quad (2.24)$$

Dimana n merupakan strain *hardening exponent*.

Pada daerah plastis, tegangan luluh (*yield strength*) sangat berpengaruh dan umumnya mengikuti kriteria luluh von mises (*von mises yield criterion*)^[4]

$$\sigma_0 = \frac{\left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2 + 6\tau_{yz}^2 + 6\tau_{zx}^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{2}} \quad (2.25)$$

Dimana σ_0 merupakan tegangan luluh material pada penarikan sederhana. Untuk kondisi *plane stress*, kriteria luluh von mises mengikuti persamaan^[14]

$$\sigma_0 = \left(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\sigma_{xy}^2 \right)^{1/2} \quad (2.26)$$

Leary (2007) menjelaskan bahwa pada pemodelan uji tarik, untuk membuat daerah non-linier (plastis) untuk material yang bersifat isotropik aturan yang digunakan ialah *isotropic hardening rule* dan *von mises plasticity*. Empiris metode elemen hingga untuk kriteria tegangan luluhnya (*yield strength*) mengikuti persamaan^[4,7] dibawah ini

Tegangan ekuivalen (σ_e)

$$\sigma_e = \left[\frac{3}{2} \{s\}^T [M] \{s\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.27)$$

Dimana $\{s\}$ merupakan *deviatoric stress*.

$$\{s\} = \{\sigma\} - \sigma_m [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (2.28)$$

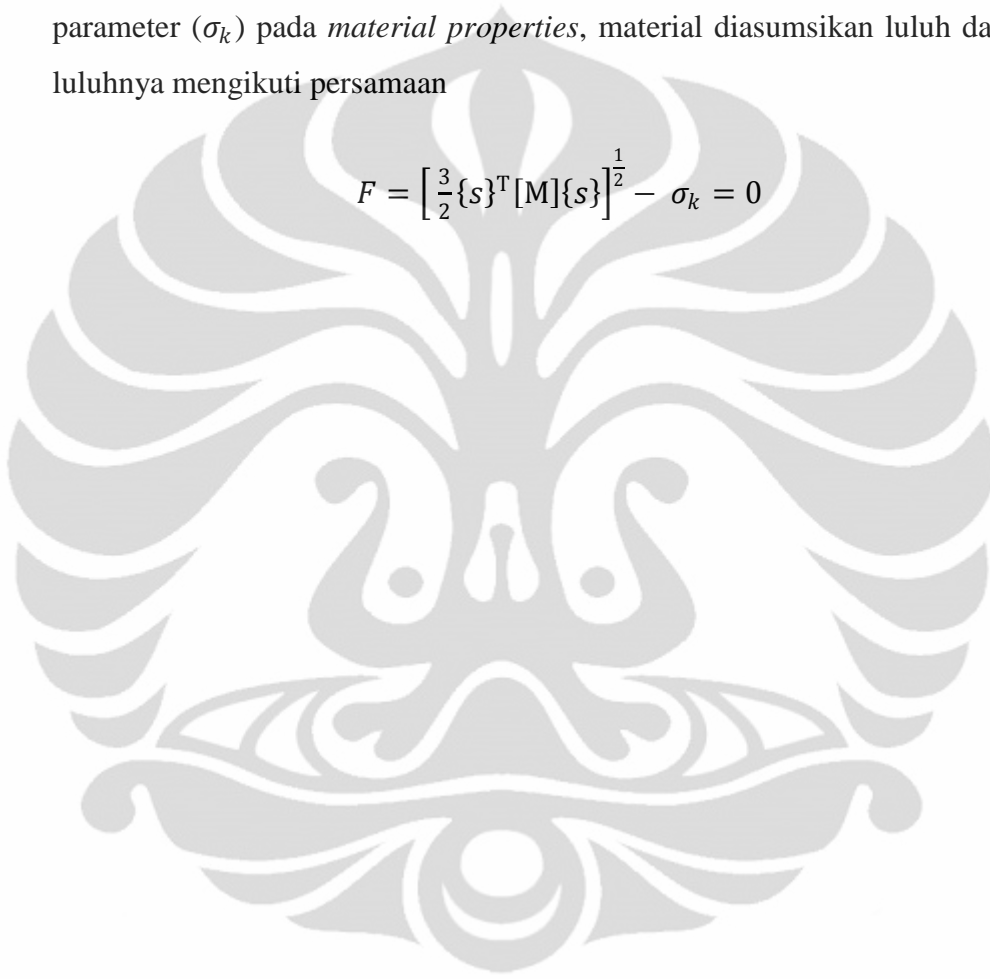
σ_m merupakan tegangan rata-rata atau tegangan hidrostatis

$$\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (2.29)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

Ketika tegangan ekuivalen sama dengan tegangan luluh yang dimasukkan sebagai parameter (σ_k) pada *material properties*, material diasumsikan luluh dan kriteria luluhnya mengikuti persamaan

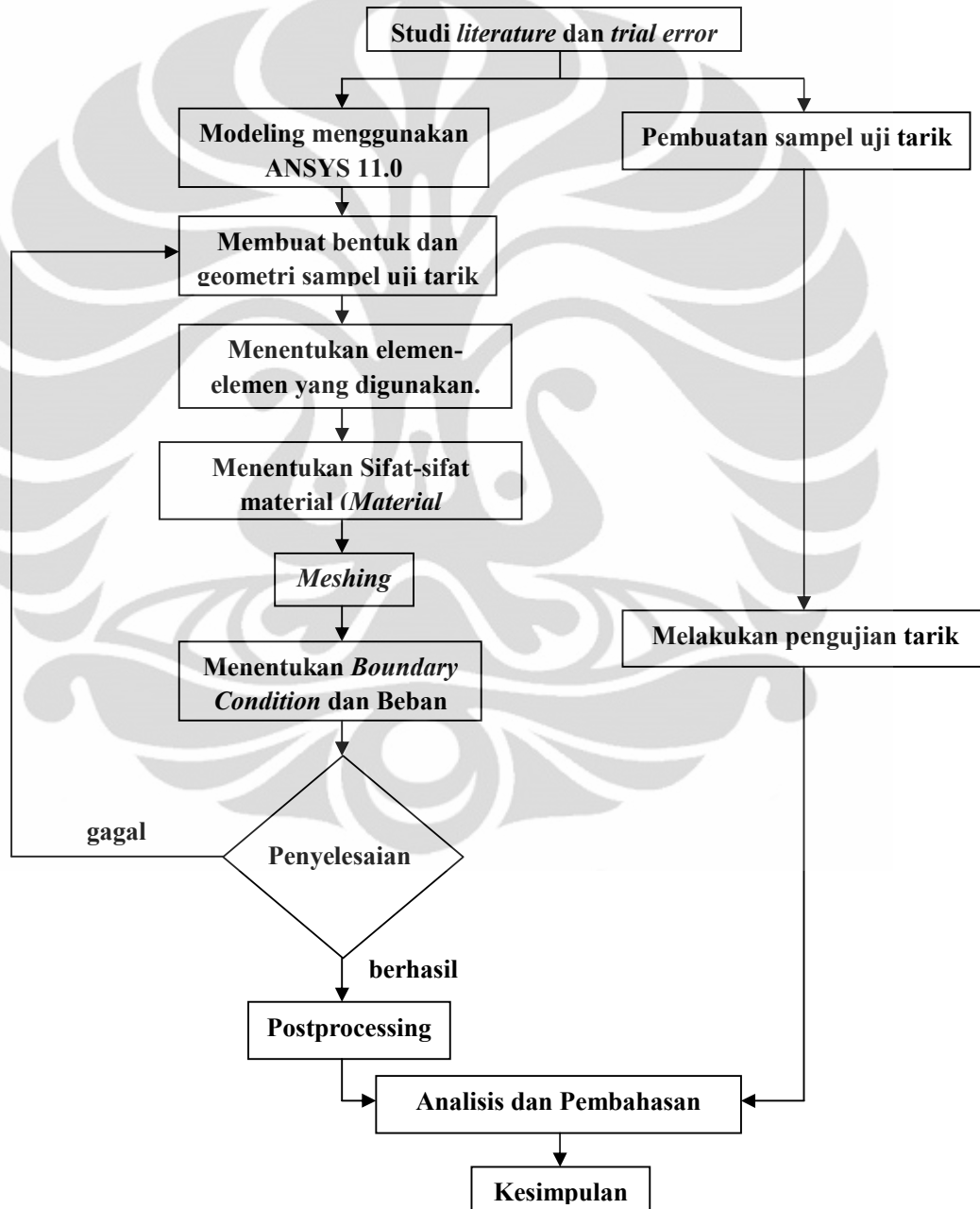
$$F = \left[\frac{3}{2} \{s\}^T [M] \{s\} \right]^{\frac{1}{2}} - \sigma_k = 0 \quad (2.30)$$



BAB 3
METODOLOGI PENELITIAN

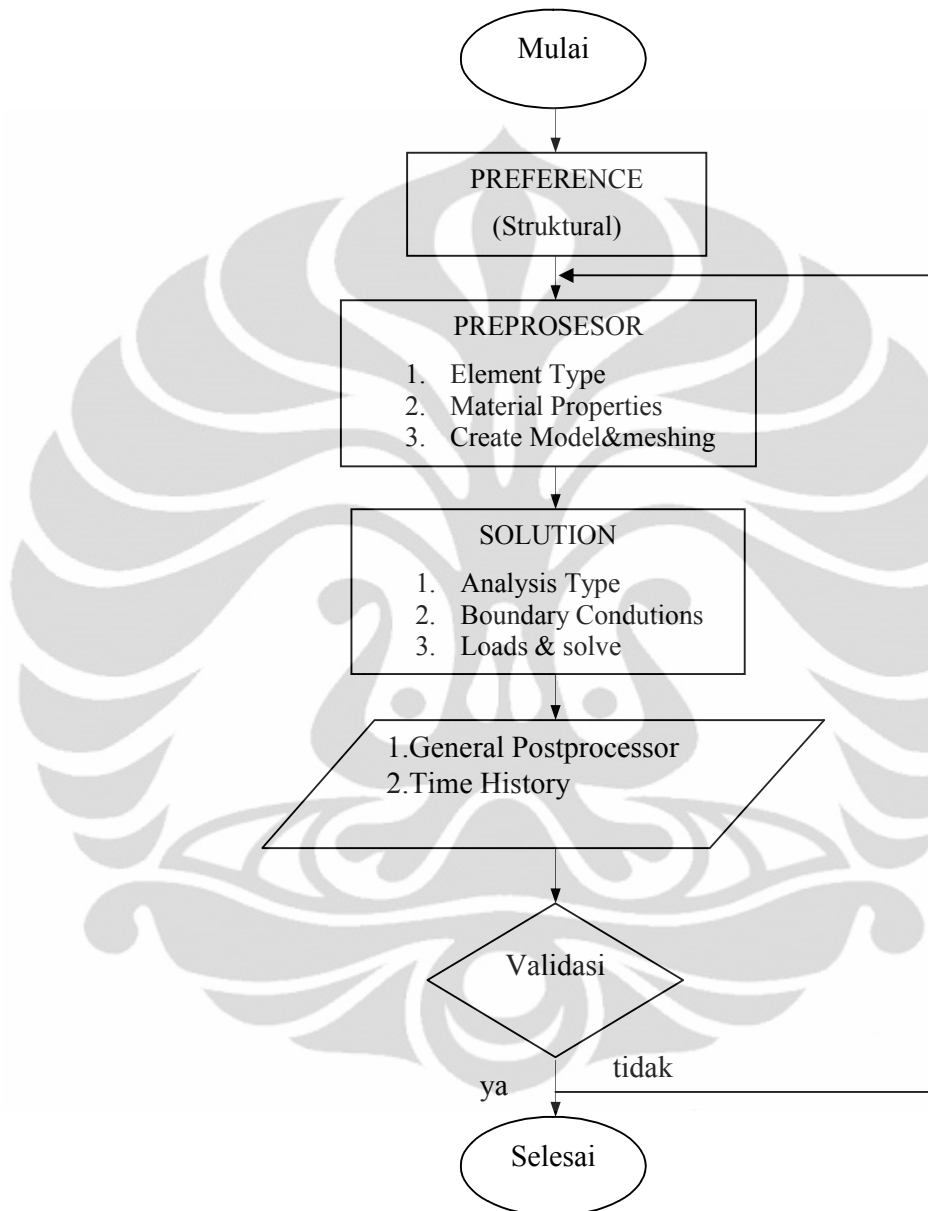
3.1 Diagram Alir Penelitian

Proses penelitian dapat dilihat pada diagram alir berikut ini:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Diagram Alir Pemodelan



Gambar 3.2 Diagram Alir Pemodelan Uji Tarik pada ANSYS 11.0

3.3 Alat dan Bahan

3.3.1 Alat

1. Universal testing machine, Servopulzer shimadzu kapasitas 20 ton.
2. Caliper dan/ atau micrometer.
3. Spidol permanen atau penggores (cutter).
4. Jangka sorong.
5. Komputer (PC) atau Laptop
6. Software ANSYS 11.0
7. Printer

3.3.2 Bahan

Baja karbon rendah (*Low Carbon Steel*) AISI 1010 berbentuk pelat.

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Pemodelan dengan menggunakan ANSYS 11.0

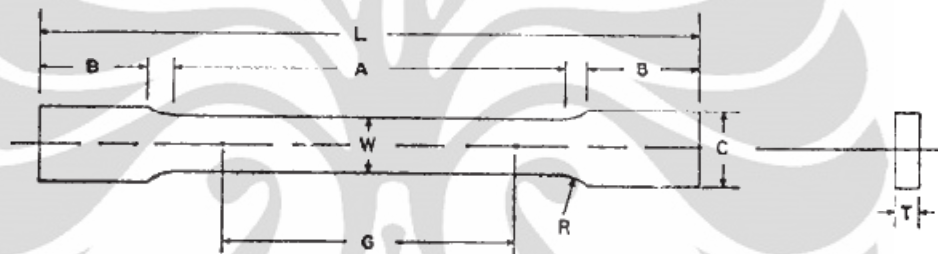
Pembuatan pemodelan dimulai dengan beberapa tahapan dengan memperhatikan nilai sejarah yang telah ada pada sampel yang akan dimodelkan. Tahapan-tahapan pemodelan secara sistematis dapat dilakukan dengan:

1. Mengumpulkan data input yang akan digunakan dalam pemodelan, yaitu meliputi geometri sampel dan *material properties* dari sampel.
2. Pembuatan sampel pemodelan uji tarik dengan menggunakan bantuan software ANSYS 11.0.
3. Pemilihan elemen yang akan digunakan pada pemodelan. Pada pemodelan ini elemen yang digunakan ialah PLANE82, yaitu elemen quadrilateral berbentuk persegi dengan 8 *node* dan PLANE 42 yaitu elemen quadrilateral berbentuk persegi dengan 4 *node*.
4. Memasukkan data-data input yaitu material properties yang berupa modulus elastisitas dan poisson rasio.
5. Melakukan proses *meshing*, yaitu proses pendiskritan sampel menjadi elemen-elemen.
6. Menetapkan *boundary condition* dan pembebanan.
7. Menjalankan proses penyelesaian.

8. Mengambil dan mengolah data-data yang diperlukan dari output hasil penyelesaian berupa tegangan dan regangan.
9. Mengulangi langkah 1 sampai 8 dan melakukan proses *remeshing* untuk sampel berikutnya.
10. Menganalisa hasil pemodelan dan menarik kesimpulan.

3.4.2 Preparasi Sampel Uji Tarik

Bentuk dan geometri sampel yang digunakan pada modeling uji tarik ini mengikuti standard sampel pengujian tarik ASTM E8^[9] dengan ketebalan 2 mm untuk memenuhi kondisi *plane stress*.



Keterangan:

A = 64 mm	W = 24.45 mm
B = 62 mm	G = 50 mm
C = 30 mm	R = 5 mm
L = 198 mm	T = 2 mm

Gambar 3.3 Bentuk dan Geometri sampel uji Tarik^[9]



Gambar 3.4 Bentuk sampel uji Tarik

Komposisi Kimia Baja Karbon Rendah AISI 1010

Tabel 3.1 Komposisi Kimia Baja Karbon Rendah AISI 1010^[11]

Unsur	Komposisi (%)
C	0.08-0.13
Mn	0.30-0.60
P	0.04
S	0.05

Spesifikasi sifat mekanik material^[18] :

1. Material : Baja Karbon Rendah AISI 1010
2. Yield strength : 305 MPa
3. Tensile strength : 365 MPa
4. Elongation : 20%
5. Berat jenis ($\times 1000 \text{ kg/mm}^3$) : 7.7-8.03
6. Modulus Elastis : 190-210 GPa
7. Poisson Ratio : 0.3

3.4.3 Uji Tarik

Tujuan dilakukannya pengujian tarik ialah untuk membuktikan apakah hasil pemodelan yang dilakukan menggunakan program ANSYS telah sesuai dengan hasil pengujian sebenarnya. Hal ini dapat dibuktikan dengan membandingkan data-data yang di dapat dari pemodelan dengan pengujian sebenarnya.



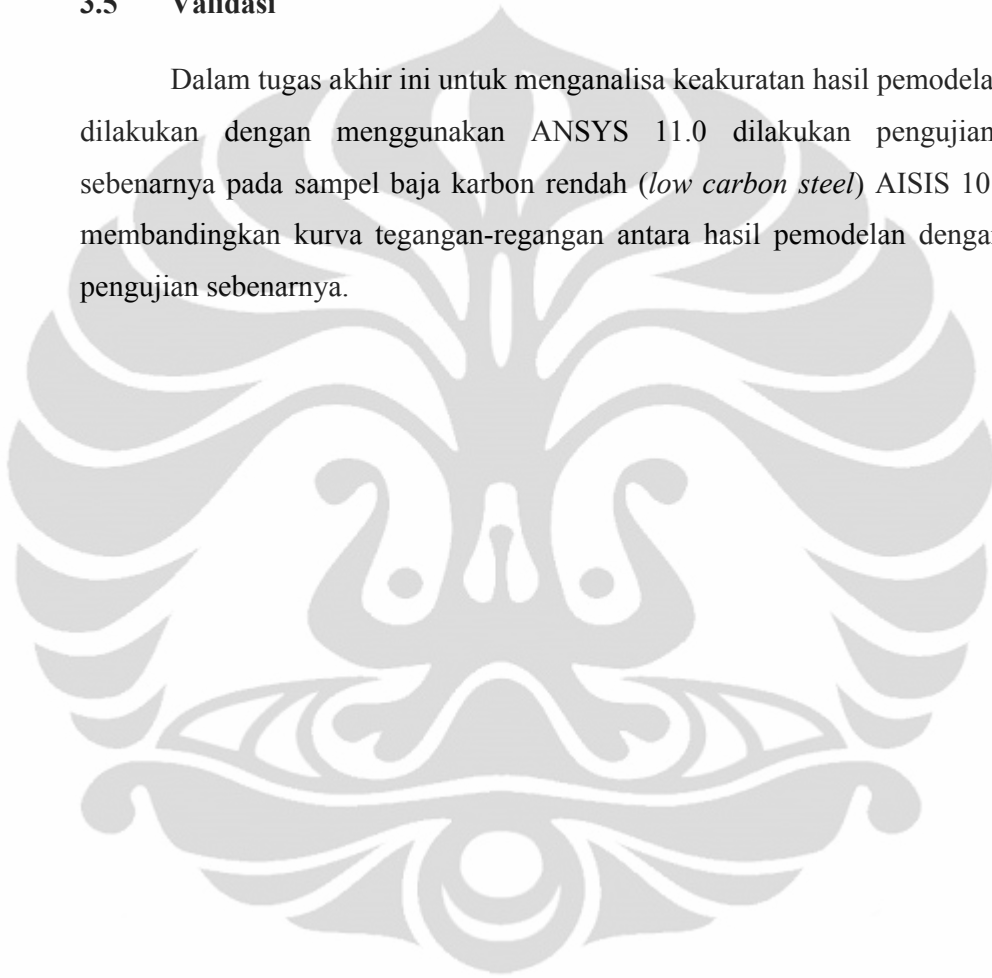
Gambar 3.5 Pengujian Tarik Sampel

Proses uji tarik ini diawali dengan melakukan pengukuran dimensi dan luas penampang dari benda uji (sampel) dengan menggunakan caliper atau micrometer, kemudian memberikan tanda pada *gaught length* berupa jarak antara dua titik pada benda uji dengan menggunakan penggores (*cutter*) atau spidol permanen. Pembuatan *gauge length* harus simetris dengan panjang benda uji keseluruhan dan mengacu kepada standar yang berlaku (ASTM atau JIS). Setelah melakukan pengukuran dan memberikan tanda pada *gauge length*, benda uji dipasang pada mesin uji tarik servopulser shimadzu untuk kemudian dilakukan proses penarikan benda uji sampai terjadinya deformasi, proses *necking*, dan akhirnya putus. Hasil pengujian ini dilihat pada grafik beban-perpanjangan. Pada grafik beban-perpanjangan ini diberikan tanda berupa titik yang menunjukkan

terjadinya pembebanan maksimum dan perpatahan yang untuk selanjutnya diolah menjadi grafik tegangan-regangan. Setelah pengujian tarik selesai dilakukan, benda uji disatukan kembali dan dilakukan pengukuran terhadap dimensi benda uji dan luas penampang setelah mengalami proses penarikan.

3.5 Validasi

Dalam tugas akhir ini untuk menganalisa keakuratan hasil pemodelan yang dilakukan dengan menggunakan ANSYS 11.0 dilakukan pengujian tarik sebenarnya pada sampel baja karbon rendah (*low carbon steel*) AISIS 1010 dan membandingkan kurva tegangan-regangan antara hasil pemodelan dengan hasil pengujian sebenarnya.

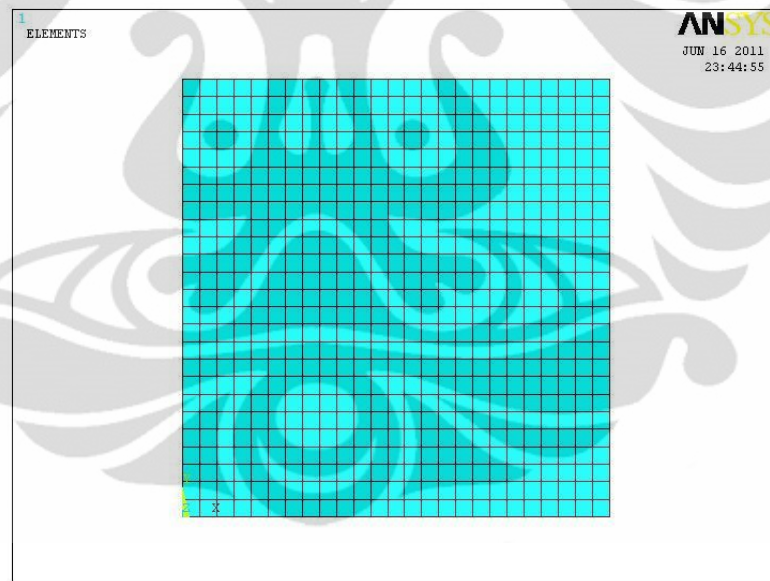


BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan

Pemodelan uji tarik ini dilakukan hanya pada separuh daerah *gauge length* karena terdapat kesimetrian geometri, pembebanan, kondisi batas, dan sifat material. Geometri dari daerah *gauge length* ini kemudian terbagi atas beberapa elemen dan *nodes*. Elemen dan *nodes* ini merupakan bentuk dari elemen hingga yang membagi daerah analisis menjadi beberapa bagian yang lebih kecil. Dengan pembentukan elemen ini maka analisis struktural dapat dilakukan lebih mudah dan mendetail. Pembentukan elemen ini dilakukan dengan menggunakan proses *meshing*.



Gambar 4.1 Bentuk geometri pemodelan separuh *gauge length* pada ANSYS 11.0 yang telah terbagi menjadi elemen dengan proses *meshing*.

Penelitian ini ingin mengetahui pengaruh jenis elemen dan jumlah *nodes* pada hasil pemodelan sehingga parameter yang digunakan dalam penelitian ini ialah jenis elemen dan jumlah *nodes* yang dapat dilihat pada tabel 4.1 dibawah ini

Tabel 4.1 Jenis elemen dan jumlah nodes

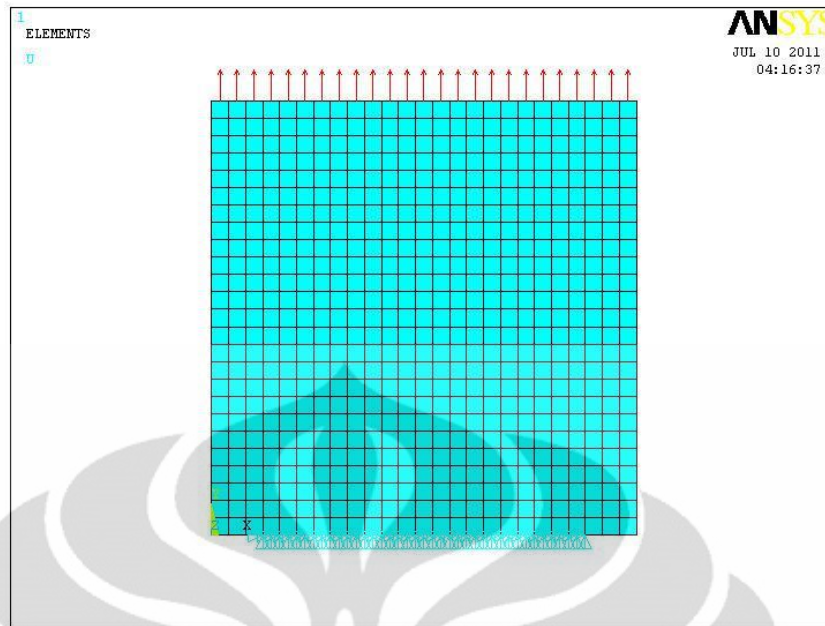
Jenis Elemen	Jumlah <i>nodes</i>	
	Panjang Elemen 1 mm	Panjang Elemen 2 mm
PLANE 82	1976	560
PLANE 42	676	196

Pemilihan kedua jenis elemen ini didasarkan pada analisis struktural dua dimensi dimana pada analisis ini terdapat dua derajat kebebasan yaitu pada arah-x dan arah-y serta output yang diharapkan ialah tegangan dan regangan. Kedua jenis elemen ini memiliki dua derajat kebebasan yaitu pada arah-x dan arah-y serta dapat menghasilkan output berupa tegangan, regangan, perubahan bentuk (*displacement*), dan Von Mises^[1]. Selain itu, pemilihan jenis elemen ini juga harus mendekati dengan sampel aktual yang ada yaitu logam. Berdasarkan karakteristik sifat isotropik dari logam sampel yang digunakan, maka pemilihan elemen PLANE 42 dan PLANE 82 ini sangat sesuai untuk analisis struktural dua dimensi.

Perbedaan dari kedua elemen ini ialah PLANE 42 merupakan elemen quadrilateral dengan 4-nodes sedangkan PLANE 82 adalah elemen quadrilateral dengan 8-nodes dimana merupakan versi elemen dengan tingkat yang lebih tinggi dari PLANE 42 sehingga elemen ini juga sangat cocok digunakan untuk analisis struktural dua dimensi dengan geometri dan sifat yang non-linier^[1].

Data *Material properties* yang digunakan sebagai data input pada pemodelan ini ialah modulus elastisitas serta poisson rasio untuk daerah elastis dan untuk daerah plastis menggunakan von mises isotropic hardening dengan data input berupa *yield strength* dan *tangent modulus*. Seluruh data input ini berdasarkan *material properties* baja karbon rendah AISI 1010 yang terdapat pada literatur.

Batasan kondisi (*boundary condition*) pada pemodelan uji tarik ini ialah salah satu sisi dibuat tidak dapat bergerak (*fixed*) dengan cara membuat derajat kebebasan pada arah-x dan arah-y sama dengan nol serta pada salah satu sisi diberikan gaya tarik uni-aksial ke arah-y seperti terlihat pada gambar 4.2 dibawah ini



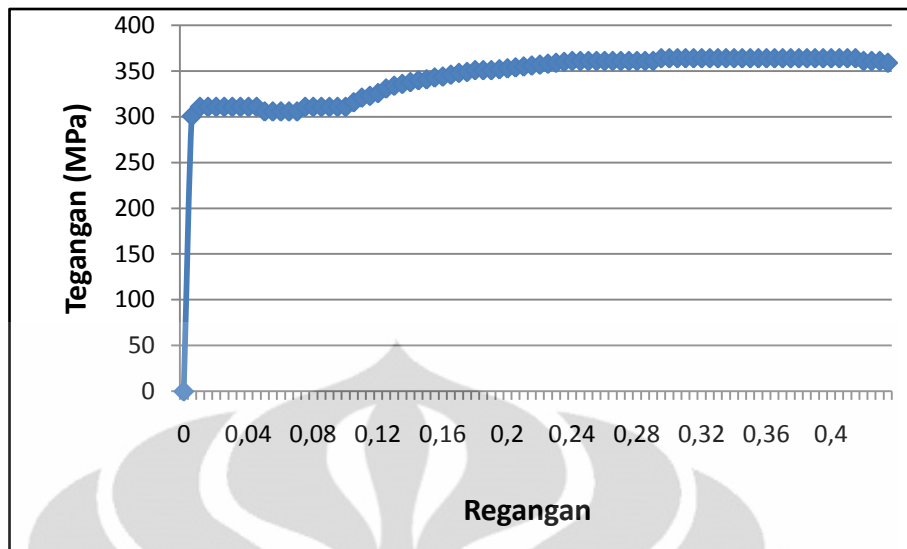
Gambar 4.2 *Boundary Condition* pemodelan uji tarik pada ANSYS 11.0

Analisis yang digunakan pada tahap *solution* di ANSYS 11.0 ialah analisis *transient dynamic* dengan integrasi waktu. Hal ini dikarenakan pada pengujian tarik terdapat perubahan beban terhadap waktu yang besarnya bertambah seiring dengan penambahan waktu. Pada pemodelan uji tarik ini dilakukan kecepatan penambahan beban sebesar 10 MPa setiap detiknya. Setelah selesai menjalankan program, pada tahap *postprocessing* data output yang diambil berupa tegangan dan regangan yang kemudian diolah menjadi kurva tegangan-regangan *engineering* serta bentuk deformasi dari geometri sampel.

4.2 Hasil Penelitian

4.2.1 Hasil Uji Tarik Aktual

Pengujian tarik sampel baja karbon rendah AISI 1010 dilakukan di laboratorium metalurgi fisik Departemen Metalurgi dan Material Universitas Indonesia. Pengujian tarik ini menggunakan Universal testing machine, Servopulzer shimadzu kapasitas 20 ton dengan beban sebesar 2000 kg. Hasil dari pengujian tarik ini berupa kurva beban terhadap pertambahan panjang yang kemudian diolah menjadi kurva tegangan-regangan *engineering* yang dapat dilihat pada gambar 4.3 dibawah ini



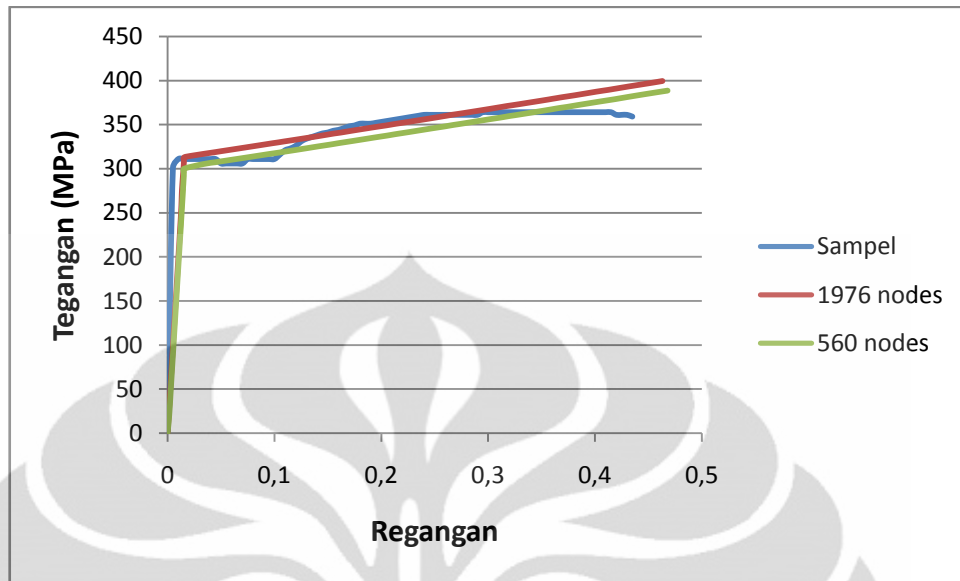
Gambar 4.3 Kurva Tegangan-Regangan *Engineering* Hasil Uji Tarik Sampel Baja Karbon Rendah AISI 1010

Berdasarkan hasil pengujian tarik ini didapatkan nilai *yield strength* sampel sebesar 300 MPa dan *ultimate tensile strength* (UTS) sebesar 364 MPa. Hal ini sesuai dengan material properties yang terdapat pada literatur dimana untuk baja karbon rendah AISI 1010 *yield strength* sebesar 305 MPa dan UTS sebesar 365 MPa.

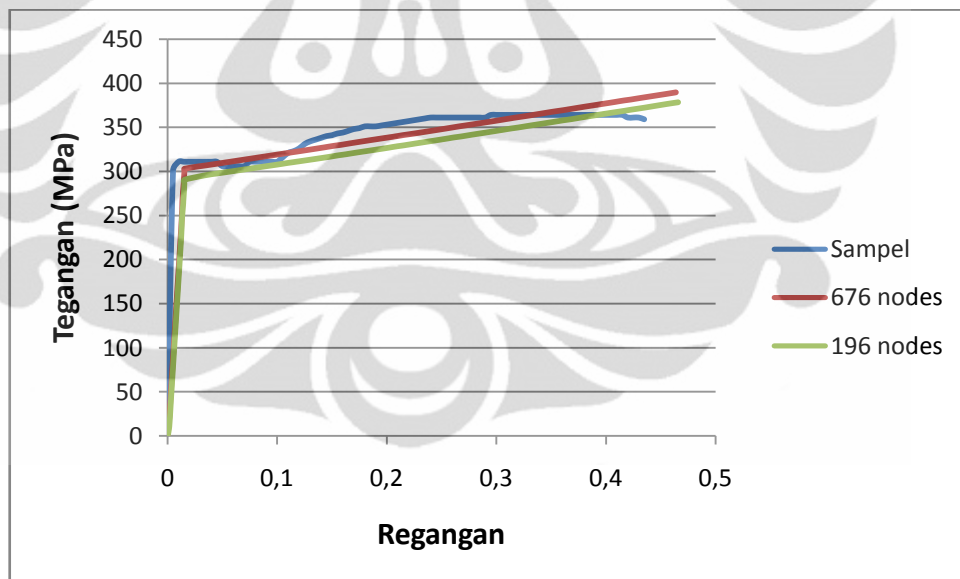
4.2.2 Hasil Pemodelan

Hasil dari pemodelan uji tarik ini ialah data output berupa tegangan dan regangan yang kemudian diolah menjadi kurva tegangan-regangan *engineering* seperti dapat dilihat pada gambar 4.4 dan 4.5 serta distribusi tegangan.

Pada gambar 4.4 terlihat perbandingan antara kurva tegangan-regangan *engineering* hasil pemodelan uji tarik dengan menggunakan elemen PLANE 82 terhadap kurva tegangan-regangan *engineering* hasil pengujian tarik aktual. Pada kurva perbandingan tersebut dapat kita lihat bahwa pemodelan dengan menggunakan jumlah node 1976 memberikan hasil yang hampir sama dengan hasil pengujian aktual dibandingkan pemodelan dengan menggunakan jumlah node 560. Hal ini dikarenakan pada metode elemen hingga perhitungan dilakukan pada tiap-tiap node sehingga semakin banyak jumlah elemen dan node, maka hasil yang didapatkan semakin akurat dan hampir mendekati aktualnya^[1].



Gambar 4.4 Perbandingan Kurva Tegangan-Regangan *Engineering* Hasil Pemodelan dengan PLANE 82 terhadap Hasil Uji Tarik Aktual Sampel Baja Karbon Rendah AISI 1010



Gambar 4.5 Perbandingan Kurva Tegangan-Regangan *Engineering* Hasil Pemodelan dengan PLANE 42 terhadap Hasil Uji Tarik Aktual Sampel Baja Karbon Rendah AISI 1010

Pada gambar 4.5 terlihat pula perbandingan antara kurva tegangan-regangan *engineering* hasil pemodelan uji tarik dengan menggunakan elemen PLANE 42 terhadap kurva tegangan-regangan *engineering* hasil pengujian tarik aktual dimana hasilnya menunjukkan bahwa elemen PLANE 42 dengan jumlah node 676 memberikan hasil yang lebih mendekati aktual dibandingkan elemen PLANE 42 dengan jumlah node 196.

Selain berdasarkan kurva tegangan-regangan, perbandingan antara hasil pemodelan dengan menggunakan ANSYS 11.0 terhadap hasil pengujian aktual juga dapat dilakukan dengan membandingkan data-data material properties yang didapat. Dalam hal ini data material properties yang digunakan ialah *yield strength* dan *ultimate tensile strength* (UTS) dimana perbandingannya dapat kita lihat pada table 4.2 dibawah ini:

Tabel 4.2 Perbandingan Material Properties Hasil Pemodelan dengan Hasil Pengujian Aktual

Perbandingan		Yield Strength (MPa)	UTS (MPa)
PLANE 82	560 nodes	305	355
	1976 nodes	305	369
PLANE 42	196 nodes	305	345
	676 nodes	305	357
Sampel		300	364

Berdasarkan tabel 4.2 dapat kita lihat perbedaan hasil pemodelan antara pemodelan yang menggunakan PLANE 42 dengan PLANE 82. Dari nilai UTS yang didapat, terlihat bahwa pemodelan dengan menggunakan PLANE 82 memberikan hasil yang lebih mendekati aktual dibandingkan dengan pemodelan yang menggunakan PLANE 42. Hal ini dapat dikarenakan PLANE 82 memiliki jumlah node dua kali lebih banyak daripada PLANE 42 sehingga perhitungan pada elemen ini lebih mendetail. Selain itu, dapat pula disebabkan node-node yang berada di tengah panjang elemen pada PLANE 82 dapat bergeser ke posisi

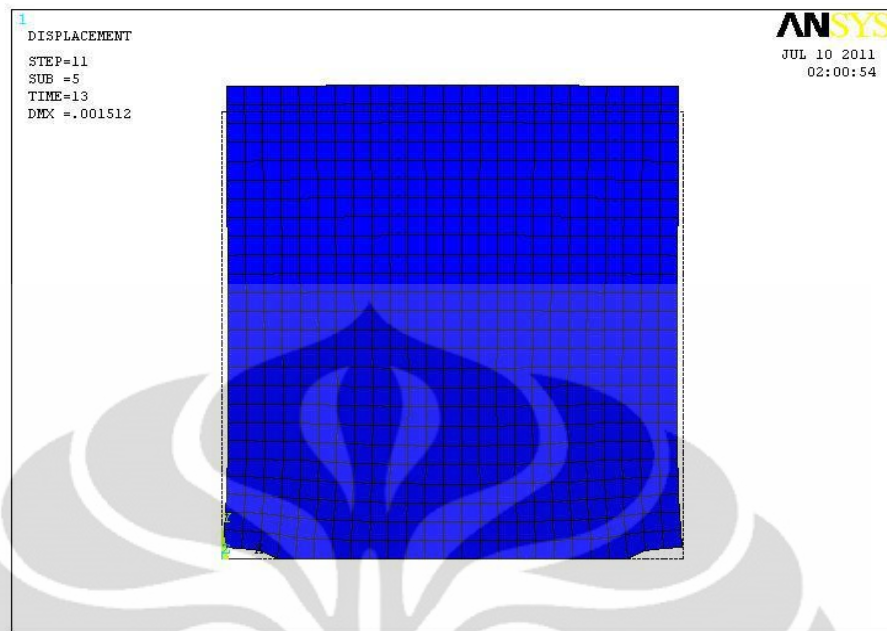
seperempat panjang elemen untuk mendapatkan kondisi singularitas yang lebih baik^[15]. Kondisi singular terjadi jika determinan dari matriks Jacobian menjadi nol^[15]. Pada pemodelan menggunakan ANSYS 11.0 perhitungan ini dilakukan secara otomatis oleh komputer pada tahap solution dan jika kondisi singular ini tidak tercapai maka proses solution pada ANSYS akan berhenti secara otomatis.

Leary Pakiding (2007) dalam tesisnya yang berjudul *Design Criteria for High Strength Steel Joints*, menjelaskan bahwa semakin banyak jumlah elemen dan node yang digunakan pada pemodelan akan memberikan hasil yang mendekati kondisi aktual namun membutuhkan waktu yang lebih lama pada proses penjalanan program.

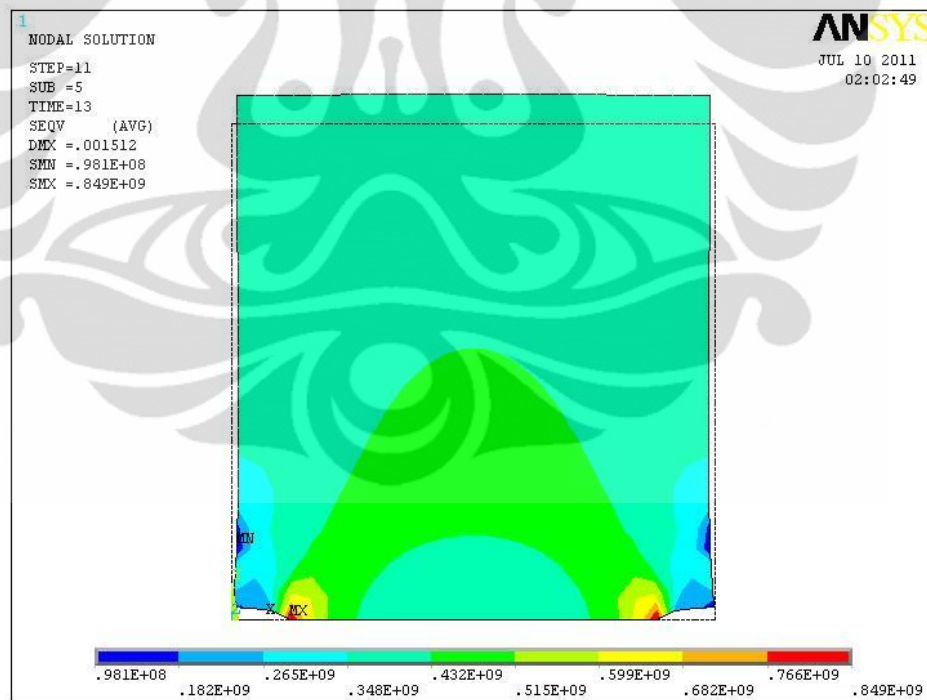
Yingbin Bao (2003) juga menjelaskan pengaruh jumlah elemen dan node pada hasil pemodelan. Pada disertasinya yang berjudul *Prediction of Ductile Crack Formation in Uncracked Bodies* dijelaskan bahwa proses terjadinya *necking* pertama kali dapat diprediksi secara akurat dengan menggunakan teknik *refine mesh*, yaitu teknik memperbanyak jumlah elemen dan node pada pemodelan.

Berdasarkan uraian diatas, maka dapat disimpulkan bahwa pemodelan dengan menggunakan jumlah elemen dan node yang lebih banyak akan memberikan hasil yang lebih akurat dan mendekati kondisi aktual.

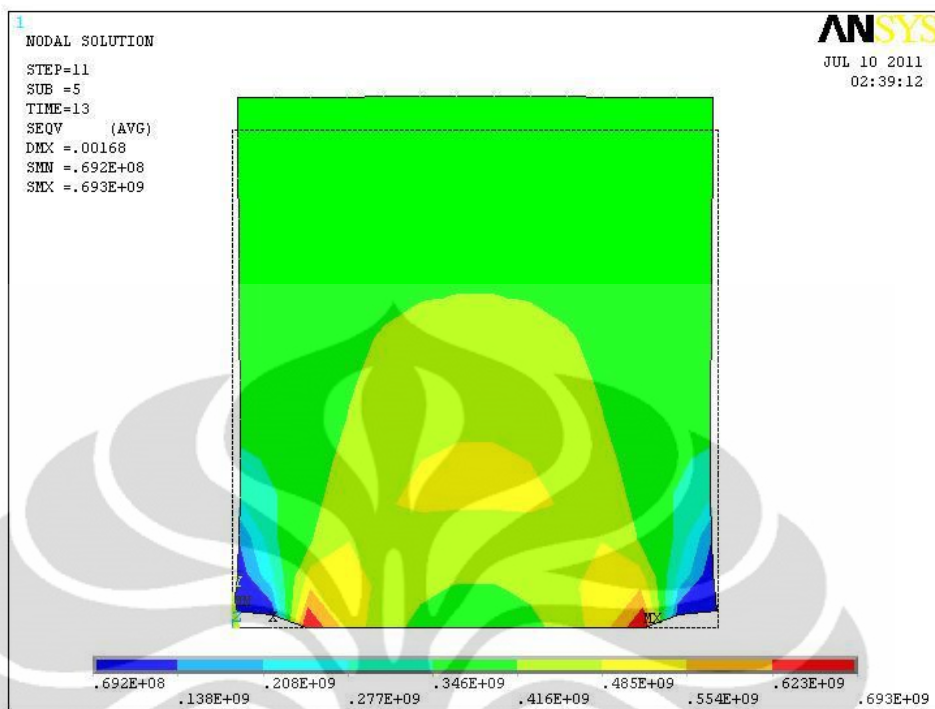
Selain perbandingan kurva tegangan-regangan *engineering*, pemodelan uji tarik ini juga menampilkan bentuk deformasi model dan distribusi tegangan von mises yang terjadi berdasarkan kontur warna yang terbentuk pada geometri pemodelan dan dapat dilihat pada gambar 4.6 sampai 4.10 dibawah ini.



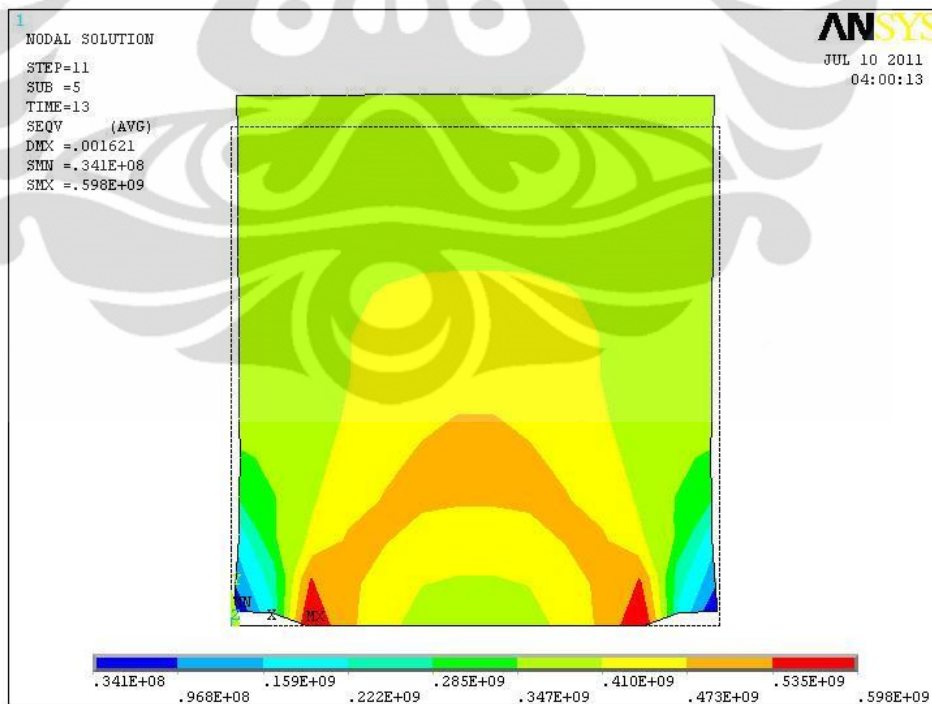
Gambar 4.6 Bentuk Deformasi Hasil Pemodelan menggunakan Elemen PLANE 82 dengan 1976 nodes



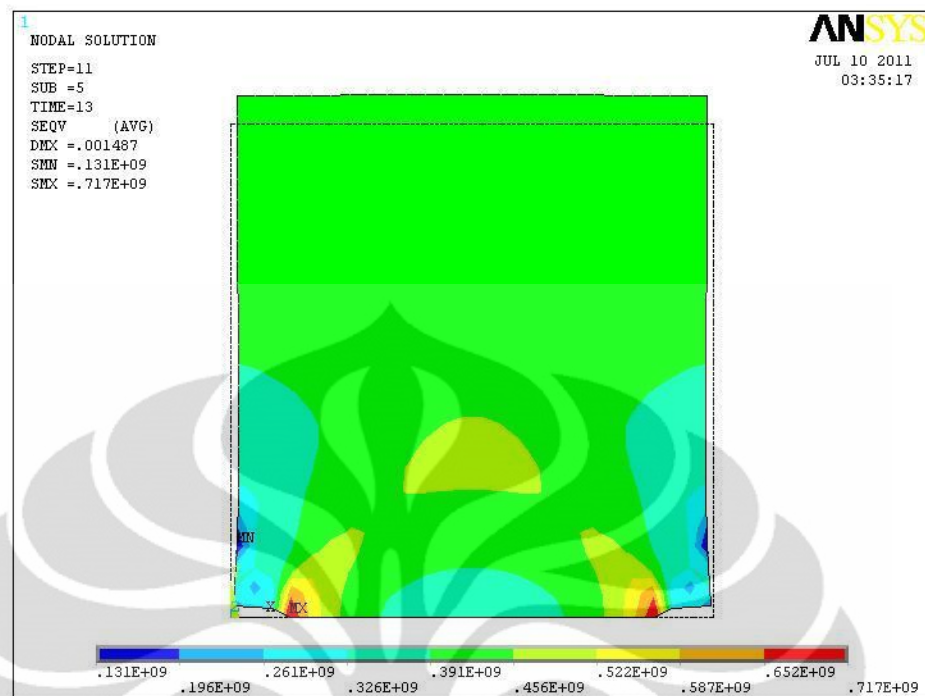
Gambar 4.7 Distribusi Tegangan Von Mises Hasil Pemodelan menggunakan Elemen PLANE 82 dengan 1976 node



Gambar 4.8 Distribusi Tegangan Von Mises Hasil Pemodelan menggunakan Elemen PLANE 82 dengan 560 node



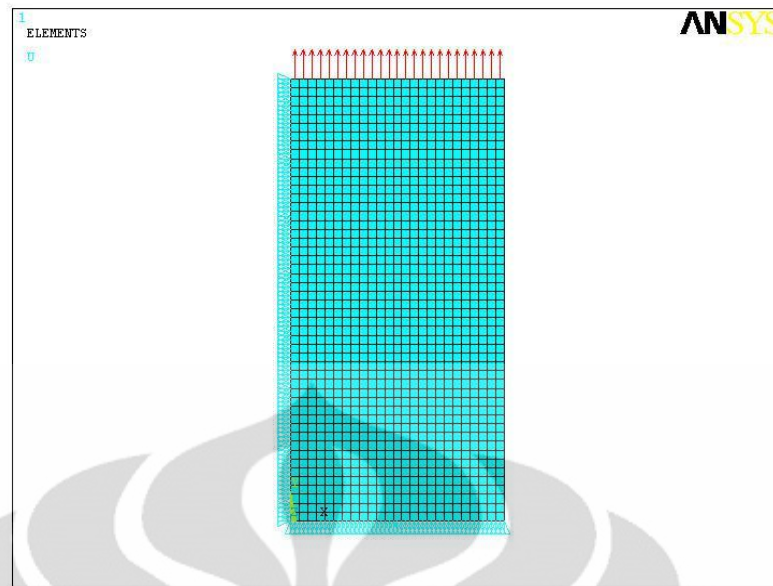
Gambar 4.9 Distribusi Tegangan Von Mises Hasil Pemodelan menggunakan Elemen PLANE 42 dengan 196 node



Gambar 4.10 Distribusi Tegangan Von Mises Hasil Pemodelan menggunakan Elemen PLANE 42 dengan 676 node

Pada gambar 4.6 dapat kita lihat bentuk deformasi yang terjadi pada sampel ketika diberikan pembebanan serta terjadinya penciutan (*necking*) pada sampel. Pada gambar distribusi tegangan von mises dapat kita lihat bahwa tegangan von mises terbesar terjadi di daerah penciutan (*necking*). Hal ini dikarenakan luas penampang pada daerah necking lebih kecil sehingga tegangan akan menjadi besar pada daerah ini.

Pada penelitian ini juga telah dicoba pemodelan dengan menggunakan geometri dan *boundary condition* seperempat dari *gauge length* seperti ditunjukkan oleh gambar 4.11 dengan tujuan agar hasil pemodelan bisa lebih baik lagi. Namun pemodelan ini tidak memberikan hasil (*error*) dikarenakan solusi pada pemodelan ini tidak konvergen



Gambar 4.11 Bentuk Geometri dan *Boundary Condition* pada Pemodelan Seperempat Gauge Length

4.3 Validasi dan Persentase Kesalahan

Untuk mengetahui validitas pemodelan uji tarik menggunakan metode elemen hingga dengan ANSYS 11.0 dilakukan *cross check* antara hasil pemodelan dengan menggunakan ANSYS 11.0 terhadap hasil pengujian tarik aktual yang dilakukan berupa perbandingan kurva tegangan-regangan. Persentase kesalahan dalam pemodelan ini ditentukan berdasarkan nilai *ultimate tensile strength* (UTS) dengan menggunakan persamaan

$$\left| \frac{\text{Nilai UTS hasil pemodelan} - \text{Nilai UTS hasil pengujian aktual}}{\text{Nilai UTS hasil pengujian aktual}} \right| \times 100\% \quad (4.1)$$

Persentase kesalahan yang didapat pada pemodelan uji tarik ini dapat dilihat pada table 4.3 dibawah ini:

Tabel 4.3 Persentase Kesalahan Pemodelan pada Penelitian ini

Jenis Elemen	Jumlah Node	Persentase Kesalahan
PLANE 82	560 nodes	2,47 %
	1976 nodes	1,37 %
PLANE 42	196 nodes	5,22 %
	676 nodes	1,92 %

Berdasarkan tabel 4.3 dapat dilihat bahwa persentase kesalahan paling besar terdapat pada PLANE 42 dengan jumlah node 196 sebesar 5,22 % dan persentase kesalahan paling kecil terdapat pada PLANE 82 dengan jumlah node 1976 sebesar 1,37 %. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah node yang digunakan pada pemodelan, maka semakin kecil pula persentase kesalahan yang didapatkan pada hasil pemodelan serta menjelaskan bahwa software ANSYS 11.0 dapat digunakan untuk melakukan pemodelan uji tarik.



BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Program ANSYS 11.0 dapat digunakan untuk melakukan pemodelan uji tarik.
2. Untuk pemodelan struktural dua dimensi, elemen yang cocok digunakan ialah elemen quadrilateral dengan 8 node atau 4 node.
3. Pada hasil pemodelan, elemen quadrilateral dengan 8 node memberikan hasil yang lebih akurat dan mendekati aktual dibandingkan elemen quadrilateral dengan 4 node
4. Pada pemodelan, semakin banyak jumlah node yang digunakan maka hasil pemodelan akan semakin akurat dan mendekati aktual (persentase kesalahan kecil).

REFERENSI

- [1] Moaveni, Saeed. (1999). *Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS*. New Jersey: Prentice Hall.
- [2] Stolarski,T., Y.Nakasone., S.Yoshimoto. (2006). *Engineering Analysis with ANSYS Software*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann
- [3] Zienkiewicz, O.C; Taylor, R.L. (2000). *The Finite Element Method, Volume 1:The Basis* (5th Edition). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [4] Zienkiewicz, O.C; Taylor, R.L. (2000). *The Finite Element Method, Volume 2: Solid Mechanics* (5th Edition). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [5] William D. Callister, Jr. (2007). *Materials Science and Engineering An Introduction* (7th Edition). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [6] Sriati Djaprie. (1993). *Metalurgi Mekanik* edisi ketiga jilid 1. Erlangga.
- [7] ANSYS 11.0. (2007). *Teory Reference for ANSYS and ANSYS Workbench*. Canonsburg: ANSYS, Inc.
- [8] McGraw-Hill Science and Technology Dictionary. (2003). New York: McGraw Hill
- [9] ASTM E 8M-04. (2004). *Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International. United States.
- [10] ASM International. (2000). ASM Handbook Vol.8. *Mechanical Testing and Evaluation*.
- [11] ASM International. (2000) ASM Handbook Vol.1. *Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*.

- [12] Pakiding, Leary. (2007). *Thesis: Design Criteria for High Strength Steel Joints*. Structural Engineering, Delft University of Technology Huisman. Itrec B.V.
- [13] Yingbin Bao. (2003). *Dissertation: Prediction of Ductile Crack Formation in Uncracked Bodies*. Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- [14] James, Mark. A. (1998). *Dissertation: A Plane Stress Finite Element Model for Elastic-Plastic Mode I/II Crack Growth*. Department of Mechanical and Nuclear Engineering, Kansas State University.
- [15] Pramono, Agus Sigit., Brata, I.Wajan., Kumiawan, Agus. (2001). *Analisa Faktor Intensitas Tegangan Modus I pada Compact Tension Specimen 2D dan 3D dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga*. Laboratorium Mekanika Benda Padat, Jurusan Teknik Mesin FTI - ITS.
- [16] Rahmat, Anni. (2007). *Skripsi: Analisa Distribusi Temperatur dan Tegangan Sisa pada Pengelasan ASTM A 131 dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga*. Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh November
- [17] Yuwono, Akhmad Herman. (2009). *Buku Panduan Praktikum Karakterisasi Material 1 Pengujian Merusak (Destructive Testing)*. Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- [18] http://www.efunda.com/materials/alloys/carbon_steels/show_carbon.cfm?ID=AISI_1010&prop=all&Page_Title=AISI%201010





FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL
 KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA
 Telp: 021 - 7863510, 78649045 Fax: 021 - 7872350
 E-mail: lum@metalui.ac.id

Lembar Data Pengujian Tarik
 (Tensile Testing Data Sheet)

Mesin Uji:	No. Kontrak:
Bahan:	Teknis/Peng uji:
Identifikasi Bahan:	Standar/Mesale Uji:

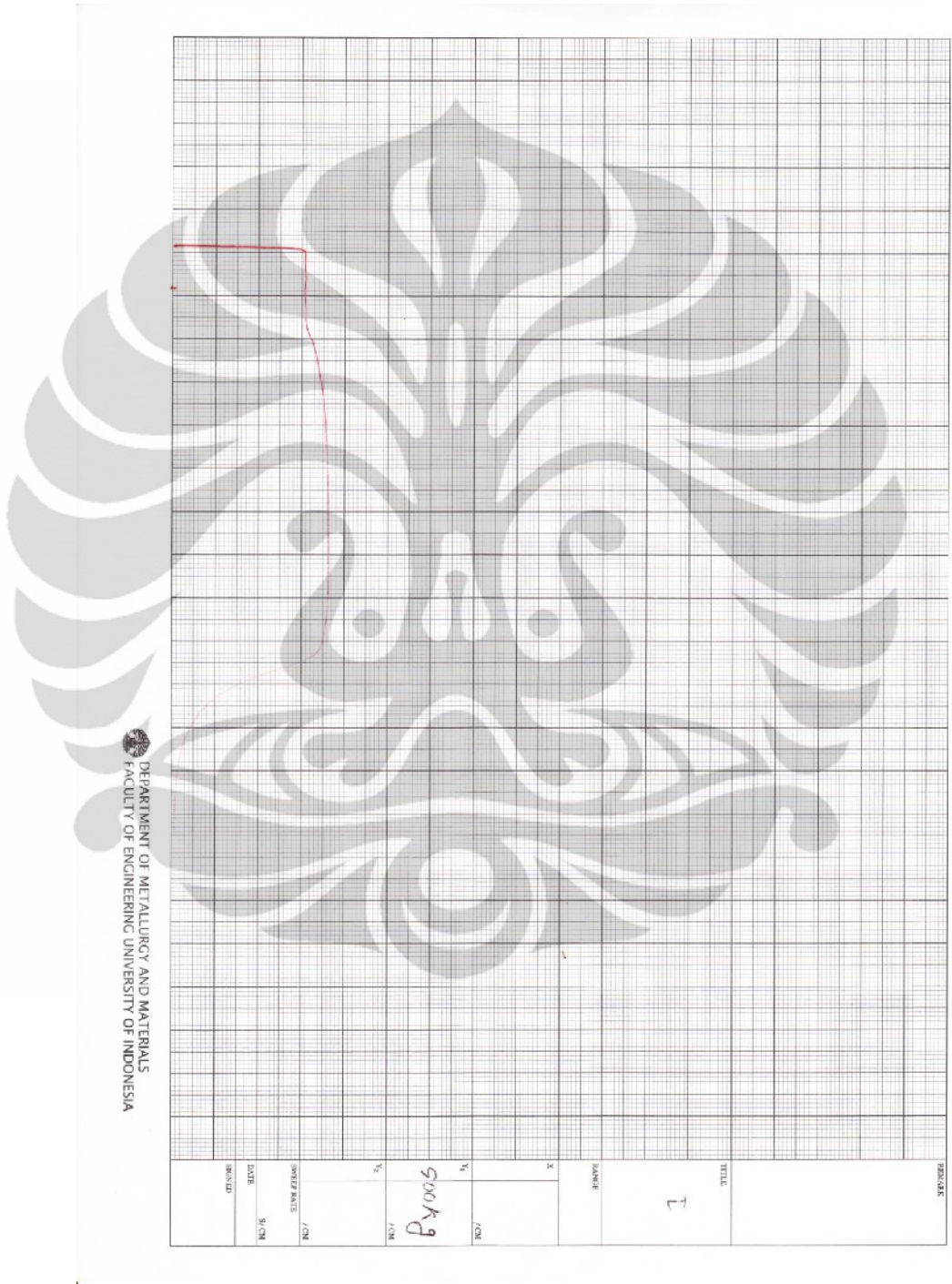
SHIRAZU
 BAJA
 PLAT

2-2201

No	Kode Sampel	Bentuk Sampel	Dimensi Sampel (mm)	Luas penampang (mm ²)	Panjang Ukur (mm)	Pu (kg)	Py (kg)	ΔL (mm)	σ_u (kg/mm ²)	σ_y (kg/mm ²)	ϵ (%)	Ket.
1		<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	$t = 2,00$ $W = 24,45$	48,90	50			21,5				
2		<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	$t = 2,00$ $W = 25,50$	48,80	50			21,20				
3		<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	$t = 2,00$ $W = 25,50$	48,80	50			22,10				
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										

* Core: yang tidak perlu

FF-26/1.U-DTMM Rev 2




 DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS
 FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

/COM, ANSYS RELEASE 11.0SP1 UP20070830 01:52:44

07/10/2011

/NOPR

/TITLE,

_LSNUM= 11

ANTYPE, 4

NLGEOM, 1

PSTRES, 1

TRNOPT, FULL, , DAMP

BFUNIF, TEMP, _TINY

NSUBST, 10, 100, 1,
KBC, 0
KUSE, 0
TIME, 13.00000000
TREF, 0.00000000
ALPHAD, 0.00000000
BETAD, 0.00000000
DMPRAT, 0.00000000
TIMINT, ON, , STRU
TINTP, R8.1, 5.000000000E-03, , ,
TINTP, R8.1, -1.00000000, 0.500000000, -1.00000000
', , ,
TINTP, R8.1, 5.000000000E-03, 0.00000000

CRPLIM, 0.100000000, 0
CRPLIM, 0.00000000, 1
NCNV, 1, 0.00000000, 0, 0.00000000,
0.00000000

NEQIT, 0

ERESX, DEFA

OUTRES, ALL, ALL,

ACEL, 0.00000000, 0.00000000, 0.00000000

OMEGA, 0.00000000, 0.00000000, 0.00000000, 0

DOMEGA, 0.00000000, 0.00000000, 0.00000000

CGLOC, 0.00000000, 0.00000000, 0.00000000

CGOMEGA, 0.00000000, 0.00000000, 0.00000000

DCGOMG, 0.00000000, 0.00000000, 0.00000000

IRLF, 0

D, 8, UX, 0.00000000, 0.00000000
D, 8, UY, 0.00000000, 0.00000000
D, 9, UX, 0.00000000, 0.00000000
D, 9, UY, 0.00000000, 0.00000000
D, 10, UX, 0.00000000, 0.00000000
D, 10, UY, 0.00000000, 0.00000000
D, 11, UX, 0.00000000, 0.00000000
D, 11, UY, 0.00000000, 0.00000000
D, 12, UX, 0.00000000, 0.00000000
D, 12, UY, 0.00000000, 0.00000000
D, 13, UX, 0.00000000, 0.00000000
D, 13, UY, 0.00000000, 0.00000000

D,	14,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	14,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	15,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	15,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	16,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	16,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	17,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	17,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	18,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	18,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	19,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	19,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	20,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	20,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	21,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	21,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	22,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	22,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	23,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	23,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	24,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	24,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	25,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	25,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	26,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	26,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	27,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	27,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	28,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	28,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	29,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	29,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	30,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	30,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	31,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	31,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	32,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	32,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	33,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	33,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	34,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	34,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	35,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	35,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	36,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	36,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	37,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	37,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	38,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	38,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	39,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	39,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	40,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	40,UY	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	41,UX	,	0.00000000	,	0.00000000
D,	41,UY	,	0.00000000	,	0.00000000

D,	42,UX	,	0.00000000	,	0.00000000		
D,	42,UY	,	0.00000000	,	0.00000000		
D,	43,UX	,	0.00000000	,	0.00000000		
D,	43,UY	,	0.00000000	,	0.00000000		
D,	44,UX	,	0.00000000	,	0.00000000		
D,	44,UY	,	0.00000000	,	0.00000000		
D,	45,UX	,	0.00000000	,	0.00000000		
D,	45,UY	,	0.00000000	,	0.00000000		
D,	46,UX	,	0.00000000	,	0.00000000		
D,	46,UY	,	0.00000000	,	0.00000000		
SFE,	601,	3,PRES,1,R5.0					
			-400000000.		-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	601,	3,PRES,2,R5.0					
			0.00000000		0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	602,	3,PRES,1,R5.0					
			-400000000.		-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	602,	3,PRES,2,R5.0					
			0.00000000		0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	603,	3,PRES,1,R5.0					
			-400000000.		-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	603,	3,PRES,2,R5.0					
			0.00000000		0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	604,	3,PRES,1,R5.0					
			-400000000.		-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	604,	3,PRES,2,R5.0					
			0.00000000		0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	605,	3,PRES,1,R5.0					
			-400000000.		-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	605,	3,PRES,2,R5.0					
			0.00000000		0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	606,	3,PRES,1,R5.0					
			-400000000.		-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	606,	3,PRES,2,R5.0					
			0.00000000		0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	607,	3,PRES,1,R5.0					
			-400000000.		-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	607,	3,PRES,2,R5.0					
			0.00000000		0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	608,	3,PRES,1,R5.0					
			-400000000.		-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	608,	3,PRES,2,R5.0					
			0.00000000		0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	609,	3,PRES,1,R5.0					
			-400000000.		-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	609,	3,PRES,2,R5.0					
			0.00000000		0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	610,	3,PRES,1,R5.0					
			-400000000.		-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	610,	3,PRES,2,R5.0					
			0.00000000		0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	611,	3,PRES,1,R5.0					
			-400000000.		-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	611,	3,PRES,2,R5.0					
			0.00000000		0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	612,	3,PRES,1,R5.0					
			-400000000.		-400000000.	0.00000000	0.00000000

SFE,	612,	3, PRES, 2, R5.0		
	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	613,	3, PRES, 1, R5.0		
	-400000000.	-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	613,	3, PRES, 2, R5.0		
	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	614,	3, PRES, 1, R5.0		
	-400000000.	-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	614,	3, PRES, 2, R5.0		
	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	615,	3, PRES, 1, R5.0		
	-400000000.	-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	615,	3, PRES, 2, R5.0		
	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	616,	3, PRES, 1, R5.0		
	-400000000.	-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	616,	3, PRES, 2, R5.0		
	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	617,	3, PRES, 1, R5.0		
	-400000000.	-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	617,	3, PRES, 2, R5.0		
	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	618,	3, PRES, 1, R5.0		
	-400000000.	-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	618,	3, PRES, 2, R5.0		
	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	619,	3, PRES, 1, R5.0		
	-400000000.	-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	619,	3, PRES, 2, R5.0		
	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	620,	3, PRES, 1, R5.0		
	-400000000.	-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	620,	3, PRES, 2, R5.0		
	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	621,	3, PRES, 1, R5.0		
	-400000000.	-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	621,	3, PRES, 2, R5.0		
	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	622,	3, PRES, 1, R5.0		
	-400000000.	-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	622,	3, PRES, 2, R5.0		
	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	623,	3, PRES, 1, R5.0		
	-400000000.	-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	623,	3, PRES, 2, R5.0		
	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	624,	3, PRES, 1, R5.0		
	-400000000.	-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	624,	3, PRES, 2, R5.0		
	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE,	625,	3, PRES, 1, R5.0		
	-400000000.	-400000000.	0.00000000	0.00000000
SFE,	625,	3, PRES, 2, R5.0		
	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000

/GOPR