

**STUDI PENGARUH KETEBALAN *SUBSTRATE*  
TERHADAP DEFORMASI PLASTIS PADA  
KONTAK ANTARA *SPHERE* DENGAN *ROUGH*  
*SURFACE***



**TESIS**

**Diajukan sebagai salah satu syarat  
untuk memperoleh gelar  
Magister Teknik Mesin pada Program Pascasarjana  
Universitas Diponegoro**

**Disusun oleh:**

**Zaenal Abidin  
NIM. L4E 007 020**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN  
PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS DIPONEGORO SEMARANG  
2010**

**STUDI PENGARUH KETEBALAN *SUBSTRATE*  
TERHADAP DEFORMASI PLASTIS PADA KONTAK  
ANTARA *SPHERE* DENGAN *ROUGH SURFACE***

Disusun oleh:

Zaenal Abidin  
NIM. L4E 007 020

Program Studi Magister Teknik Mesin  
Program Pascasarjana Universitas Diponegoro

Menyetujui

Tanggal, .....

Ketua

Dr. Ir. AP. Bayuseno, M.Sc  
NIP 196205201989021001

Pembimbing

Co. Pembimbing.

Joga Dharma Setiawan, BSc., MSc., PhD  
NIP 19681110 200501 1001

Dr. Jamari, ST, MT  
NIP 19740304 200012 1001

## ABSTRAK

### STUDI PENGARUH KETEBALAN *SUBSTRATE* TERHADAP DEFORMASI PLASTIS PADA KONTAK ANTARA *SPHERE* DENGAN *ROUGH SURFACE*

Zaenal Abidin  
NIM L4E 007020

Penelitian ini menganalisa tentang perbandingan deformasi pada pemodelan kontak *sphere* dengan *rough surface* untuk daerah *fully plastic*. Analisa deformasi ini berkaitan dengan perubahan volume, dimana pada saat perubahan volume maka permukaan yang saling kontak tersebut akan mengalami deformasi akibat meningkatnya tegangan, dan regangan saat melakukan kontak pertama kali sampai mengalami kondisi dimana deformasi tersebut berkurang/kondisi *steady*.

Perhitungan perbandingan deformasi plastis ini dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh faktor elastisitas pada daerah plastis setelah terdeformasi, dimana bila terdapat suatu benda dengan ketebalan yang berbeda dengan material yang sama kemudian diberi beban, maka deformasi plastis yang terjadi pada masing-masing benda adalah sama.

Validasi untuk perhitungan dari FEM *Ansys 9.0* ini adalah eksperimen dan hasil menunjukkan bahwa deformasi plastis *sphere* dengan *rough surface* tersebut tidak sama karena hal ini dipengaruhi oleh geometri ukuran ketebalan dari setiap *speciment* tersebut. Sifat material yang digunakan pada pemodelan ini adalah *elastic-perfectly plastic*. *Speciment* dengan ketebalan lebih kecil akan mengalami deformasi plastis lebih besar dibandingkan dengan spesimen yang memiliki ketebalan yang lebih besar.

Kata kunci: mekanika kontak, kontak *fully plastic*, deformasi plastis, *sphere*, *rough surface*

## **ABSTRACT**

### ***STUDY THE EFFECT OF SUBSTRATE THICKNESS ON PLASTIC DEFORMATION ON THE CONTACT BETWEEN A SPHERE AND A ROUGH SURFACE***

**Zaenal Abidin  
NIM L4E 007020**

*This research analyzes the comparison of plastic deformation of the contact between a sphere and a rough surface in the fully plastic contact regime. The analysis is related to the volume change. This volume change caused the deformation as a result of the increased stress and strain in the steady state condition.*

*The calculation of the plastic deformation is aimed to understand the effect of substrate thickness on the plastic deformation of its asperity. If there are substrate with different thickness but with the same material property, when they are loaded, the plastic deformation of each body will not be the same.*

*Experiment is conducted to validate the result of FEA simulation with ANSYS 9.0. It is found that the plastic deformation between a sphere and a rough surface is not the same. This because of the dimension of the thickness from each specimen. The material property used in this modeling is elastic-perfectly plastic. The specimen with the smaller thickness will have the bigger asperity plastic deformation compared to the thicker thickness.*

*Key words: mechanical contact, fully plastic contact, plastic deformation, sphere, rough surface.*

## **PEDOMAN PENGGUNAAN TESIS**

Tesis S2 yang tidak dipublikasikan terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Diponegoro, dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada penulis dengan mengikuti aturan HAKI yang berlaku di Universitas Diponegoro.

Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau peringkasan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai dengan kebiasaan ilmiah untuk menyebutkan sumbernya. Memperbanyak atau menerbitkan sebagian atau seluruh tesis haruslah seizin Direktur Program Pascasarjana Universitas Diponegoro.

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, atas segala rahmat, taufik serta hidayah-Nya sehingga tesis berjudul “Studi Pengaruh Ketebalan Substrate terhadap Deformasi Plastis pada Kontak antara *Sphere* dengan *Rough Surface*” dapat diselesaikan. Penulisan tesis ini tentunya tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, baik yang secara langsung dan tidak langsung, oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

Bapak Joga Dharma Setiawan, BSc, MSc, Ph.D., selaku Pembimbing yang telah memberi pengarahan, bimbingan dan koreksi selama penyusunan tesis ini.

Bapak Dr. Jamari J., ST, MT., selaku Co Pembimbing yang telah memberi pengarahan, bimbingan dan koreksi selama penyusunan tesis ini.

Bapak Dr. Ir. A.P. Bayuseno, MSc, selaku Ketua Prodi Magister Teknik Mesin UNDIP, yang telah mendukung proses belajar mengajar penulis.

Seluruh Dosen dan Staf Program Pascasarjana Jurusan Teknik Mesin UNDIP, yang telah mendukung proses belajar mengajar penulis.

Seluruh rekan Dosen dan Staf Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Semarang, yang telah memberi dorongan semangat kepada penulis.

Rekan-rekan Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin UNDIP yang telah banyak memberikan masukan kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih belum sempurna. Oleh karena itu, kritik membangun dan saran untuk penyempurnaannya sangat penulis harapkan, semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi kita.

Semarang, September 2010

Penulis

# DAFTAR ISI

|  |            |
|--|------------|
| <b>ABSTRAK</b>   | <b>iii</b> |
| <b>ABSTRACT</b>  | <b>iv</b>  |
| <b>PEDOMAN PENGGUNAAN TESIS</b>  | <b>v</b>   |
| <b>KATA PENGANTAR</b>  | <b>vi</b>  |
| <b>DAFTAR ISI</b>  | <b>vii</b> |
| <b>DAFTAR LAMPIRAN</b>   | <b>ix</b>  |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b>   | <b>x</b>   |
| <b>DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG</b>  | <b>xii</b> |
| <b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>   | <b>1</b>   |
| 1. 1 Latar Belakang  | 1          |
| 1. 2 Originalitas Penelitian   | 2          |
| 1. 3 Pembatasan Masalah  | 2          |
| 1. 4 Tujuan Penelitian   | 2          |
| 1. 5 Manfaat Penelitian  | 3          |
| 1. 6 Metodologi Penelitian   | 3          |
| 1. 7 Sistematika Penulisan   | 4          |
| <b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b>  | <b>5</b>   |
| 2. 1 <i>Rough Surface</i>  | 5          |
| 2. 2 Topografi Permukaan: Tekstur Permukaan, Kekasaran, Gelombang              | 6          |
| 2. 3 Kontak antara Permukaan Kasar   | 7          |
| 2. 4 Kontak Elastis-Plastis  | 9          |
| 2. 4. 1 Kontak Elastis   | 10         |
| 2. 4. 2 Kontak Plastis   | 11         |
| <b>BAB 3 PEMODELAN ELEMEN HINGGA</b>   | <b>18</b>  |
| 3. 1 Teori Metode Elemen Hingga  | 18         |
| 3. 1. 1 Konsep Dasar Analisa MEH   | 19         |
| 3. 1. 2 Prosedur Analisa Struktur  | 19         |
| 3. 1. 3 Implementasi-implementasi pada Komputer                                | 19         |
| 3. 1. 4 Jenis Elemen pada MEH  | 19         |
| 3. 1. 5 Fungsi Elemen pada Metode Elemen Hingga Mengacu pada <i>Polynomial</i> | 20         |
| 3. 2 <i>Flow Chart</i> Pemodelan dalam FEM ANSYS 9.0                           | 22         |
| 3. 3 Spesifikasi Masalah   | 23         |
| 3. 4 Proses <i>Pre-processing</i>  | 24         |
| 3. 4. 1 Penentuan Area   | 24         |
| 3. 4. 2 Penentuan Tipe Elemen  | 29         |
| 3. 4. 3 Penentuan Sifat Material ( <i>Material Property</i> )                  | 30         |
| 3. 4. 4 <i>Meshing</i>   | 32         |
| 3. 4. 5 Penentuan kontak dan target permukaan                                  | 34         |
| 3. 5 Solusi ( <i>solution</i> )  | 41         |
| 3. 6 Proses <i>Post-processing</i>   | 46         |

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| <b>BAB 4</b> | <b>EKSPERIMEN .....</b>   | <b>51</b> |
| 4.1          | Spesimen.....   | 51        |
| 4.2          | Prosedur Eksperimen.....  | 51        |
| 4.3          | Peralatan Pendukung .....   | 52        |
| 4.4          | Detail Eksperimen .....   | 53        |
| <b>BAB 5</b> | <b>HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>                                    | <b>56</b> |
| 5.1          | Hasil Simulasi dan Eksperimen pada <i>Real Surface</i> .....        | 56        |
| 5.2          | Hasil Perbandingan Deformasi pada Simulasi dan Eksperimen .         | 56        |
| 5.2.1        | Deformasi pada Simulasi dan Eksperimen untuk<br>Beban 8000 N .....  | 57        |
| 5.2.2        | Deformasi pada Simulasi dan Eksperimen untuk<br>Beban 11000 N.....  | 58        |
| 5.2.3        | Deformasi pada Simulasi dan Eksperimen untuk<br>Beban 20000 N ..... | 59        |
| <b>BAB 6</b> | <b>KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>                                    | <b>60</b> |
| 6.1          | Kesimpulan.....   | 60        |
| 6.2          | Saran .....   | 60        |
|              | <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>   | <b>61</b> |
|              | <b>DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH .....</b>                                | <b>65</b> |

## DAFTAR LAMPIRAN

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Lampiran A: Hasil Plot <i>Von Misses Stress</i> dari FEM ANSYS 9.0<br/>untuk <i>Load 8000 N</i> saat <i>Loading</i> dan <i>Unloading</i> .....</b>  | <b>66</b> |
| <b>Lampiran B: Hasil Plot <i>Von Misses Stress</i> dari FEM ANSYS 9.0<br/>untuk <i>Load 11000 N</i> saat <i>Loading</i> dan <i>Unloading</i> .....</b> | <b>67</b> |
| <b>Lampiran C: Hasil Plot <i>Von Misses Stress</i> dari FEM ANSYS 9.0<br/>untuk <i>Load 20000 N</i> saat <i>Loading</i> dan <i>Unloading</i> .....</b> | <b>68</b> |
| <b>Lampiran D: Hasil Simulasi dan Eksperimen .....</b>   | <b>69</b> |
| <b>Lampiran E: Hasil Deformasi FEM dan Eksperimen pada Asperiti .....</b>  | <b>76</b> |

## DAFTAR GAMBAR

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Gambar 1. 1  | Aplikasi Tribologi .....  | 1  |
| Gambar 1. 2  | Diagram Alir Metodologi Penelitian .....  | 3  |
| Gambar 2. 1  | Surface Topografi.....  | 6  |
| Gambar 2. 2  | Representasi Umum dari Permukaan (a) satu-dimensi dan<br>(b) dua-dimensi.....           | 7  |
| Gambar 2. 3  | Struktur Topografi yang Tidak Rata ( <i>asperity</i> ).....                             | 8  |
| Gambar 2. 4  | Deformasi <i>Plastic</i> pada <i>Asperity</i> .....                                     | 14 |
| Gambar 2. 5  | Diagram Kontak Benda Bebas, Gaya Titik Diskrit dan<br>Lapisan Plastis .....             | 15 |
| Gambar 3. 1  | Analisa Elemen Hingga.....  | 18 |
| Gambar 3. 2  | Elemen yang Lazim Digunakan pada Analisa FEM. ....                                      | 20 |
| Gambar 3. 3  | Elemen <i>Quadratic</i> .....   | 21 |
| Gambar 3. 4  | <i>Flow Chart</i> Pemodelan dalam FEM ANSYS 9.0.....                                    | 22 |
| Gambar 3. 5  | Deskripsi Kondisi Batas Tumpuan.....  | 23 |
| Gambar 3. 6  | <i>Menu Retangle by Corners</i> .....   | 24 |
| Gambar 3. 7  | <i>Plot Area 1</i> .....  | 25 |
| Gambar 3. 8  | <i>Menu Create Rectangle by Dimensions</i> .....  | 26 |
| Gambar 3. 9  | <i>Copy Area 1</i> .....  | 26 |
| Gambar 3. 10 | <i>Plot Substraction Area 1</i> dengan <i>Area 2</i> .....                              | 27 |
| Gambar 3. 11 | <i>Menu Part Annular Circ Area</i> .....  | 27 |
| Gambar 3. 12 | <i>Plot Area 1</i> dan <i>Area 2</i> .....  | 28 |
| Gambar 3. 13 | Hasil dari <i>Plot Lines</i> dan <i>Arcs</i> . ....                                     | 28 |
| Gambar 3. 14 | <i>Menu Element Types</i> .....   | 29 |
| Gambar 3. 15 | <i>Menu Library of Element Types</i> .....  | 29 |
| Gambar 3. 16 | <i>Menu Element Types</i> .....   | 30 |
| Gambar 3. 17 | <i>Menu Define Material Model Behaviour</i> .....                                       | 30 |
| Gambar 3. 18 | <i>Menu Linear Isotropic Properties for Material Numb</i> .....                         | 31 |
| Gambar 3. 19 | <i>Multilinear Esontropik Hardening For Number 1</i> .....                              | 31 |
| Gambar 3. 20 | <i>Plot Kurva Tegangan-regangan<br/>Multilinear Esontropik Hardening</i> .....          | 32 |
| Gambar 3. 21 | <i>Menu Element Size at Picked Areas</i> .....  | 32 |
| Gambar 3. 22 | <i>Areas</i> Hasil Pembagian <i>Element</i> .....                                       | 33 |
| Gambar 3. 23 | Seleksi <i>Area</i> yang Akan <i>dimeshing</i> .....                                    | 33 |
| Gambar 3. 24 | <i>Menu Rerine Mesh at Element</i> .....  | 33 |
| Gambar 3. 25 | <i>Plot Meshing Area</i> dengan <i>Refine Mesh at Element</i> ..                        | 34 |
| Gambar 3. 26 | <i>Menu Contact Manager</i> .....   | 34 |
| Gambar 3. 27 | <i>Menu Contact Wizard</i> untuk <i>Target Surface</i> .....                            | 35 |
| Gambar 3. 28 | Seleksi <i>Lines</i> sebagai <i>Target</i> .....  | 35 |
| Gambar 3. 29 | <i>Menu Contact Wizard</i> untuk <i>Pick Existing Free Keypoint</i> .....               | 36 |
| Gambar 3. 30 | <i>Menu Slect Keypoint for Pilo</i> .....   | 36 |
| Gambar 3. 31 | <i>Plot</i> Seleksi <i>Keypoint</i> sebagai <i>Center</i> .....                         | 37 |
| Gambar 3. 32 | Seleksi <i>Lines</i> sebagai <i>Target</i> .....  | 37 |
| Gambar 3. 33 | <i>Menu Contact Wizard</i> untuk <i>Pick Existing Free Keypoint</i> .....               | 38 |
| Gambar 3. 34 | <i>Plot</i> Seleksi <i>Nodal</i> pada <i>Lines</i> sebagai <i>Contact Surface</i> ..... | 38 |
| Gambar 3. 35 | <i>Menu Contact Wizard</i> untuk <i>Coefficient of Friction</i> .....                   | 39 |

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Gambar 3. 36 | Menu <i>Contact Properties</i> .  | 39 |
| Gambar 3. 37 | Menu <i>Contact Properties2</i>   | 40 |
| Gambar 3. 38 | Menu <i>Contact Wizard</i> untuk Status Kontak  | 40 |
| Gambar 3. 39 | Menu <i>Contact Manager</i> Penentuan <i>Contact</i> dan<br><i>Target Surface</i> .                       | 40 |
| Gambar 3. 40 | Plot <i>CONTACT172</i> dan <i>TARGET169</i> .   | 41 |
| Gambar 3. 41 | Seleksi <i>Lines</i> Bagian Bawah <i>Speciment</i> untuk<br>Penentuan Kondisi Batas.                      | 41 |
| Gambar 3. 42 | Menu <i>Apply U, ROT on Lines</i> .   | 42 |
| Gambar 3. 43 | Seleksi <i>Lines</i> pada Sumbu Simetri untuk Kondisi Batas   | 42 |
| Gambar 3. 44 | Plot Kondisi Batas Tumpuan  | 43 |
| Gambar 3. 45 | Seleksi <i>Keypoints</i>  | 43 |
| Gambar 3. 46 | Menu <i>Apply F/M on KPs</i> .  | 44 |
| Gambar 3. 47 | Menu <i>Solution Controls</i> .   | 44 |
| Gambar 3. 48 | Menu <i>Solution Controls2</i> .  | 45 |
| Gambar 3. 49 | Menu <i>Solve Load Step File</i>  | 45 |
| Gambar 3. 50 | Menu <i>Contour Nodal Solution Data</i> .   | 46 |
| Gambar 3. 51 | Distribusi Tegangan <i>von Misses</i> pada Gaya Kontak 8000 N.  | 46 |
| Gambar 3. 52 | Seleksi <i>Line Contact</i>   | 47 |
| Gambar 3. 53 | <i>Menu List Nodal Solution</i>   | 48 |
| Gambar 3. 54 | <i>Menu PRNSOL Command 1</i>  | 48 |
| Gambar 3. 55 | <i>Menu PRNSOL Command 2</i> .  | 49 |
| Gambar 3. 56 | <i>Menu Sort NODE Listing</i> .   | 49 |
| Gambar 3. 57 | <i>Menu NLIST Command</i> .   | 50 |
| Gambar 4. 1  | Spesimen  | 51 |
| Gambar 4. 2  | Mesin Uji Tekan   | 52 |
| Gambar 4. 3  | Komponen Peralatan Pendukung  | 52 |
| Gambar 4. 4  | Diagram Alir Eksperimen   | 53 |
| Gambar 4. 5  | Micrometer dan Center Locator   | 54 |
| Gambar 4. 6  | Gambar Skema Pengukuran Spesimen  | 54 |
| Gambar 5. 1  | (a) Plot deformasi pada <i>real surface</i> dan (b) Pembesaran ( <i>zoomed</i> )                          | 56 |
| Gambar 5. 2  | (a) Plot deformasi plastis terhadap jarak/posisi untuk beban 8000 N dan (b) Pembesaran ( <i>zoomed</i> )  | 57 |
| Gambar 5. 3  | (a) Plot deformasi plastis terhadap jarak/posisi untuk beban 11000 N dan (b) Pembesaran ( <i>zoomed</i> ) | 58 |
| Gambar 5. 4  | (a) Plot deformasi plastis terhadap jarak/posisi untuk beban 20000 N dan (b) Pembesaran ( <i>zoomed</i> ) | 59 |

## DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

| SINGKATAN  | Nama                           | Pemakaian<br>pertama kali<br>pada |                                   |
|------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| FEM        | <i>Finite Element Method</i>   |                                   | 19                                |
| FEA        | <i>Finite Element Analysis</i> |                                   | 19                                |
| LAMBANG    | Nama                           | Satuan                            | Pemakaian<br>pertama kali<br>pada |
| $A$        | Luas permukaan kontak          | [mm <sup>2</sup> ]                | 11                                |
| $E$        | Modulus elastisitas            | [MPa]                             | 2                                 |
| $E^*$      | Modulus efektif kontak         | [MPa]                             | 13                                |
| $P$        | Gaya kontak                    | [N]                               | 11                                |
| $Y$        | Kekuatan luluh material        | [MPa]                             | 2                                 |
| $\nu$      | <i>Poisson's ratio</i>         | [-]                               | 2                                 |
| $\omega$   | <i>Interference</i>            | [mm]                              | 2                                 |
| $\omega_c$ | <i>Critical Interference</i>   | [mm]                              | 13                                |
| $R$        | Jari-jari asperity             | [mm]                              | 13                                |
| $H$        | Kekerasan dari material lunak  | [GPa]                             | 14                                |
| $K$        | Koefisien kekerasan            | [-]                               | 14                                |
| $A_f$      | Fungsi area                    | [-]                               | 14                                |
| $z$        | Tinggi asperiti                | [mm]                              | 6                                 |
| $T$        | Tebal spesimen                 | [mm]                              | 2                                 |

# BAB 1 PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Tribologi berasal dari bahasa Yunani yaitu *Tribos* yang berarti menempel dan *Logos* yang berarti ilmu. Tribologi industri merupakan suatu ilmu yang mempelajari tentang interaksi antar permukaan kontak yang bergerak relatif satu terhadap yang lain.

Ada dua aspek yang dipelajari yaitu *Science* yang berbasis pada mekanika dan *Technology* yang berbasis *design*, *manufactur*, dan *maintenance*. Tribologi industri sangat menaruh perhatian pada permasalahan kontak antar permukaan, keausan (*wear*), pelumasan (*lubrication*), dan gesekan (*friction*) (Astakhov, V.P. 2007). Gambar 1.1 di bawah memperlihatkan beberapa contoh aplikasi tribologi, diantaranya adalah bearing, sistem rem pada kereta, dan roda gigi.

Gesekan adalah hal yang sering ditemui ketika dua buah benda saling bersinggungan. Akibat yang ditimbulkan gesekan bisa bermacam-macam, misalnya bunyi berderit, kenaikan suhu permukaan ataupun ausnya permukaan. Munculnya panas akibat gesekan juga mengakibatkan material menjadi lunak dan memungkinkan rusak pada kontak permukaannya. Karena itu, prediksi yang akurat dari perubahan yang cepat pada proses kontak gesekan dan pengendalian terhadap hal tersebut adalah hal yang sangat penting dari sisi ekonomi (Bushman, 1999a).



Bearing

Sistem rem kereta

Roda gigi

**Gambar 1. 1 Contoh aplikasi tribologi (www.partsengine.com)**

Deformasi kontak akan terjadi ketika dua permukaan benda padat saling menekan. Berdasar peninjauan skala yang digunakan, deformasi kontak dapat dikategorikan sebagai *macro contact* dan *micro contact*. Umumnya permukaan benda padat adalah tajam pada skala mikro. Titik-titik tertinggi (*microprotrusions*), biasa disebut asperiti, ada pada semua permukaan padat.

## 1.2 Originalitas Penelitian

Penelitian tentang deformasi plastis yang terjadi akibat interaksi permukaan kontak antara *sphere* dengan *rough surface (axysimmetric)* dengan variabel beban versus ketebalan *plate* selama ini belum pernah dilakukan, untuk itu permasalahan ini diangkat menjadi obyek penelitian dalam tesis.

## 1.3 Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah yang ada dalam tesis ini meliputi hal-hal sebagai berikut:

1. Pembebanan berupa *interference ( $\omega$ )* pada *sphere* bagian atas sedangkan *rough surface* bagian bawah di-*fixed*.
2. Spesimen yang digunakan dalam eksperimen adalah kuningan (*brass*), modulus elastisitas ( $E$ ) = 97 GPa, *Poisson's ratio* ( $\nu$ ) = 0.34, *yield strength* ( $Y$ ) = 0,341 GPa.
3. *Sphere (indenter)* baja, modulus elastisitas ( $E$ ) = 200 GPa, *Poisson's ratio* ( $\nu$ ) = 0.32, *yield strength* ( $Y$ ) = 0,9115 GPa.
4. *Load* yang digunakan sebesar 8000 N, 11000 N dan 20000 N.
5. Ketebalan ( $T$ ) spesimen adalah 1,5 mm, 3 mm, 6 mm, 9 mm, dan 12 mm.

## 1.4 Tujuan Penelitian

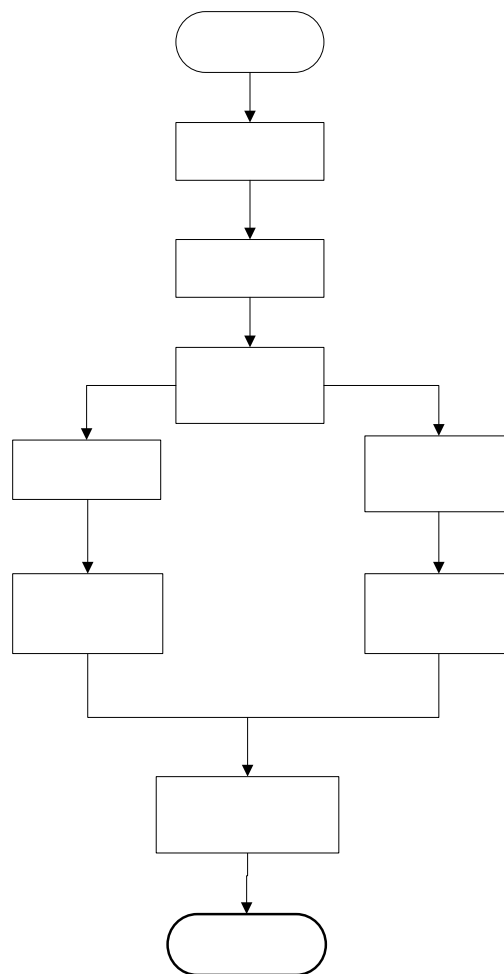
1. Menganalisa deformasi plastis di sekitar zona kontak antara *sphere* dengan *rough surface*.
2. Mengkaji pengaruh ketebalan spesimen terhadap deformasi plastis pada kontak antara *sphere* dengan *rough surface*.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Dapat mempelajari pengaruh karakterisasi kekasaran dan radius indenter pada bidang kontak, sehingga dapat digunakan untuk menentukan mekanisme kontak yang tepat serta dapat memprediksikan umur pakai sebuah komponen.

### 1.6 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang digunakan dalam tesis ini seperti ditunjukkan pada Gambar 1.2 berikut:



**Gambar 1.2 Diagram alir metodologi penelitian**

Penelitian dimulai dari kasus kontak yang terjadi antara *sphere* dengan *rough surface* dengan pemberian kondisi batas untuk kasus kontak tersebut.

Mulai

Kasus Ko

Kondisi B

Pemecah  
Masala

Selanjutnya pemecahan masalah dilakukan dengan dua metode, yaitu melalui eksperimen dan simulasi. Eksperimen dilakukan di dalam laboratorium sedangkan software *ANSYS* digunakan sebagai alat simulasi dalam penyelesaian kasus tersebut. Penelitian dari hasil eksperimen digunakan sebagai dasar literatur sekaligus pembanding dari simulasi FEM. Validasi kebenaran penelitian diperoleh dari data-data tersebut. Penelitian dinyatakan selesai apabila kriteria deformasi plastis bahan spesimen memenuhi berdasarkan hasil simulasi maupun eksperimen, dimana terjadi selisih tebal awal spesimen dengan tebal setelah ada pembebanan.

## **1.7 Sistematika Penulisan**

### **Bab 1 Pendahuluan**

Berisi latar belakang, perumusan masalah, originalitas penelitian, pembatasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

### **Bab 2 Tinjauan pustaka**

Membahas tentang kajian pustaka dan dasar teori terkait dengan materi

### **Bab 3 Pemodelan menggunakan metode elemen hingga**

Berisi pengertian elemen hingga, langkah langkah umum metode elemen hingga, pengaplikasian, prosedur pemodelan meliputi: spesifikasi masalah, validasi, dan simulasi.

### **Bab 4 Eksperimen**

Berisi pelaksanaan dan prosedur eksperimen, spesimen, peralatan pendukung, dan detail eksperimen.

### **Bab 5 Hasil dan pembahasan**

Berisi hasil simulasi metode elemen hingga, hasil eksperimen, dan perbedaan harga deformasi plastis hasil simulasi dengan hasil eksperimen.

### **Bab 6 Kesimpulan dan saran**

Membahas tentang kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan dan saran perbaikan guna meningkatkan hasil penelitian.

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

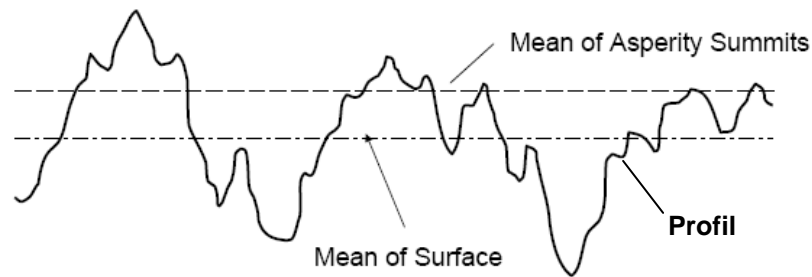
### 2.1 *Rough Surface*

Mekanika kontak sering dihubungkan dengan nama Heinrich Hertz (1882). Pada tahun 1882 Hertz telah memecahkan masalah yang melibatkan kontak antara dua benda elastis dengan permukaan lengkung. Hertz memperkenalkan *interference  $\omega$*  sebagai variabel yang penting untuk mengetahui deformasi elastis. Ketika dua permukaan benda yang kasar jika diamati dalam skala mikro, ditekan dan diberi beban bersama-sama maka akan terjadi deformasi pada kedua permukaannya (Hertz, 1882). Awalnya kontak akan terjadi pada jumlah *asperities* yang sedikit, kemudian jumlah *asperities* yang mengalami kontak akan menjadi lebih banyak dengan memberikan beban normal yang lebih besar. Kontak aktual terjadi pada *asperities* dari permukaan benda yang saling kontak, dan luas permukaan kontak nyata yang terjadi merupakan jumlah luas permukaan kontak dari *asperities* yang saling kontak juga. Berdasarkan beban yang diberikan terhadap *asperities* dan sifat materialnya, *asperities* akan mengalami deformasi *plastic*, *elastic-plastic*, atau *fully plastic*. Berikutnya barulah Greenwood dan Williamson (1996) mengembangkan temuan Hertz. Teori Hertz menjadi dasar untuk menganalisa permasalahan kontak, dimana *asperities* terdeformasi secara elastis.

Semua hal yang berhubungan dengan mekanisme kontak antara dua benda dipelajari dalam ilmu mekanika kontak (*contact mechanics*), yang merupakan bagian dari ilmu tribologi. *Contact mechanics* mempelajari mengenai tegangan dan deformasi yang timbul ketika permukaan saling bersentuhan satu sama lain pada satu titik atau lebih (*contact*), dimana gerakan dua atau lebih benda dibatasi oleh suatu *constraint*. Kontak yang terjadi antara dua benda dapat berupa titik (*point*), garis (*line*) ataupun permukaan (*surface*). Jika kontak yang terjadi diteruskan dan dikenai suatu beban kontak, maka kontak yang awalnya berupa suatu titik dapat berubah menjadi bentuk ataupun permukaan yang lain.

## 2.2 Topografi Permukaan: Tekstur Permukaan, Kekasaran, Gelombang

Topografi permukaan adalah representasi tiga dimensi dari ketidakrataan permukaan geometris. Sebuah permukaan dapat melengkung, kasar atau halus tergantung pada besar dan jarak antara puncak dan lembah dan juga tergantung pada bagaimana permukaan dibuat. Tekstur permukaan mengacu pada simpangan terbatas permukaan geometri ideal dari part.



**Gambar 2.1** *Surface topography*

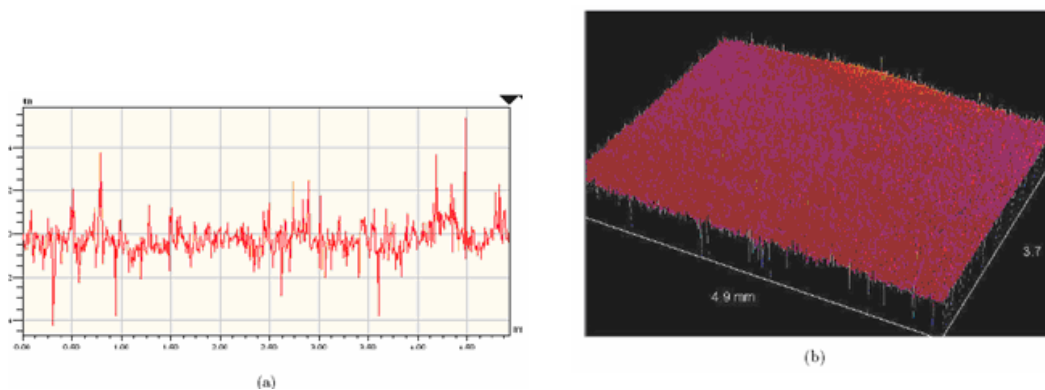
Karakteristik sebenarnya dari kekasaran permukaan diperlukan untuk menganalisis pengaruh kekasaran permukaan pada berbagai parameter tribologis. Kekasaran berkaitan dengan ketidakrataan jarak dekat yang tertinggal pada suatu permukaan dari sebuah proses produksi. Hal ini merupakan ukuran tekstur permukaan atau penyimpangan yang baik, berdekatan, acak. Gelombang adalah komponen tekstur dimana kekasaran saling tumpang tindih. Hal itu berkaitan dengan penyimpangan jarak luas dari kekasaran yang disebabkan oleh getaran, cengkeraman, perlakuan panas, atau regangan Song, J.F (1992). Kekasaran permukaan tidak dapat dengan mudah ditentukan oleh satu parameter. Bahkan, ada beberapa cara untuk menunjukkan kekasaran. Semua permukaan kasar memiliki tinggi dan panjang gelombang, dengan bentuk yang diukur pada sudut kanan permukaan dan yang terakhir dalam bidang permukaan. Distribusi ketinggian diukur dari bidang referensi (misalnya, datar).

Karakteristik permukaan bisa jadi satu dimensi (1-D) atau dua dimensi (2-D) tergantung pada pemesinan dan proses finishing. Untuk kasus 1-D, tinggi ( $z$ ) bervariasi dengan salah satu koordinat, sedangkan koordinat lain terdapat "*lay*" dimana variasi dari  $z$  relatif kecil. Tapi untuk permukaan yang dibuat oleh proses

manufaktur konvensional, ketika karakterisasi 1-D tidak sesuai, maka diperlukan deskripsi kekasaran permukaan 2-D. Atomic Force Microscope (AFM) dan profilometer permukaan 3D digunakan untuk meningkatkan resolusi dan keakuratan pengukuran kekasaran. Representasi 1-D dan 2-D khusus dari permukaan datar nominal (poles) ditunjukkan pada Gambar. 2.2 (a) dan 2.2 (b). Skala yang digunakan untuk ketinggiannya jauh lebih besar dari pada panjang gelombang karena ketinggian *asperity* dari kedataran sangat kurang jika dibandingkan dengan panjang gelombang.

### 2.3 Kontak antara Permukaan Kasar

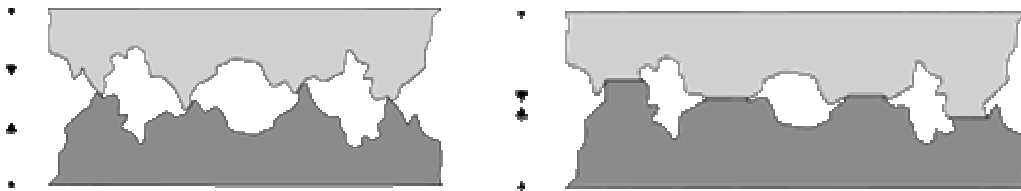
Permukaan asli pada benda padat berisi ketidakraturan atau penyimpangan bentuk-bentuk geometris yang ditetapkan. Bahkan permukaan paling halus pun mengandung penyimpangan ketinggian yang melebihi beberapa kali jarak antar atom. Tidak ada permukaan memiliki geometri sempurna. Dengan perbesaran yang cukup tinggi, kekasaran permukaan dapat dilihat. Ketika dua permukaan saling kontak, ujung dari permukaan kasar atau asperiti pertama kali membawa beban, dan daerah kontak sebenarnya adalah sebagian kecil dari area kontak yang terlihat atau nominal. Lebih lanjut, kekasaran permukaan memiliki peran penting pada gesekan antara dua permukaan.



**Gambar 2. 2 Representasi umum dari permukaan, (a) satu-dimensi dan (b) dua-dimensi (Bhowmik, K, 2007)**

Model kontak elastis yang diusulkan oleh Hertz (1882) berdasarkan pada asumsi bahwa akan ada kontak tunggal antara *indenter* dan material elastis sempurna homogen yang memiliki permukaan halus. Tetapi jika permukaan kasar, maka kontak antara ujung *indenter* dan *asperity* permukaan terbentuk. Untuk model kontak asperiti tunggal, bidang kontakannya lebih sedikit, dan dengan demikian tegangan yang dihasilkan akan menjadi tinggi pada beban yang kecil. Jadi pada tahap awal, kekasaran akan mengalami deformasi plastis yang memberikan perpindahan lebih banyak daripada yang ditentukan oleh deformasi elastis. Namun, Tabor (1951) menyatakan bahwa pada indentasi jauh lebih dalam dari sepuluh kali ketinggian *asperity*, efek kekasaran diabaikan.

Kebanyakan suatu komponen mengalami kontak mekanis pada permukaan ketika sedang dalam kondisi kerja, seperti kontak antara roda gigi, silinder dengan linier pada motor bakar dan *bearing*. Pada permukaan komponen yang belum mengalami kontak ketika dilakukan pembesaran sepersekian *micron*, maka permukaan tersebut memiliki struktur *topografi* yang tidak rata (*asperity*) akibat dari proses pemesinan. Lihat gambar 2.3.



**Gambar 2. 3 Struktur topografi yang tidak rata (*Asperity*) (Hiroshi, I., 2003)**

Pada Gambar 2.3 permukaan yang tidak rata (*asperity*) akan mengalami deformasi dan keausan yang sangat tinggi akibat meningkatnya tegangan, gesekan, keausan dan peningkatan suhu saat melakukan kontak pertama kali sampai mengalami kondisi dimana keausan dan deformasi tersebut berkurang/kondisi *steady*, proses inilah yang disebut dengan *running-in*. Setelah kondisi keausan dan deformasi *steady*, maka selanjutnya dalam waktu tertentu keausan dan deformasi tersebut meningkat kembali, tetapi hal ini tidak disebabkan

oleh faktor *running-in* tetapi akibat faktor kelelahan material dan usia pakai dari material tersebut.

Di dalam kehidupan sehari-hari kita mengenal proses *running-in* dengan istilah *in reyen* (ambil contoh di dalam motor bakar), pada saat kita membeli motor baru maka akan ada istilah tersebut. Istilah ini bermaksud agar pengguna menggunakan motor dengan hati-hati dan sesuai ketentuan yang telah ditetapkan oleh pabrikan, karena pada kondisi ini sangat rawan sekali terjadi keausan dan deformasi yang berlebih akibat dari pemakaian yang tidak sesuai dengan aturan.

Perubahan-perubahan seperti ini sangat menguntungkan ketika proses *running-in* berjalan dengan baik yaitu derajat dari *komformitas* meningkat sehingga permukaan pada area kontak menjadi lebih baik. Pada kasus kontak tertentu, karena beberapa kondisi kontak, bila tingkat derajat dari konformitas itu tidak dicapai maka akan menimbulkan kegagalan pada komponen-komponen sesaat setelah operasi pada kontak awal.

#### **2.4 Kontak Elastis-Plastis**

Kemajuan lebih lanjut dalam bidang mekanika kontak di abad pertengahan ke dua puluh bisa dihubungkan dengan nama-nama seperti Bowden dan Tabor (1951). Bowden dan Tabor adalah ilmuwan yang pertama menekankan pentingnya kekasaran permukaan untuk benda-benda di dalam kontak. Melalui penyelidikan kekasaran permukaan, daerah kontak sebenarnya antara benda yang saling bergesekan ditemukan menjadi kurang dari daerah kontak yang nyata. Pemahaman seperti itu juga secara drastis telah mengubah arah yang dilakukan tribologi. Pekerjaan-pekerjaan dari Bowden dan Tabor menghasilkan beberapa teori-teori di dalam mekanika kontak dengan permukaan kasar.

Penelitian dengan kondisi statis telah dilakukan oleh Hertz (1882). Teori Hertz membahas tentang kontak elastis. Hertz memperkenalkan *interference  $\omega$*  sebagai variabel yang penting untuk mengetahui deformasi elastis. Berikutnya barulah Greenwood dan Williamson (1966) mengembangkan temuan Hertz. Teori Hertz menjadi dasar untuk menganalisa permasalahan kontak.

Semua hal yang berhubungan dengan mekanisme kontak antara dua benda dipelajari dalam ilmu mekanika kontak (*contact mechanics*), yang merupakan

bagian dari ilmu tribologi. *Contact mechanics* mempelajari mengenai tegangan dan deformasi yang timbul ketika permukaan dua solid bodies saling bersentuhan satu sama lain pada satu titik atau lebih (*contact*), dimana gerakan dua atau lebih benda dibatasi oleh suatu *constraint*. Kontak yang terjadi antara dua benda dapat berupa titik (*point*), garis (*line*) ataupun permukaan (*surface*). Jika kontak yang terjadi diteruskan dan dikenai suatu beban kontak, maka kontak yang awalnya berupa suatu titik dapat berubah menjadi bentuk ataupun permukaan yang lain.

Bentuk area kontak tergantung pada bentuk lengkungan (*curvature*) dari benda yang saling kontak. Sebagai contoh, kontak titik terjadi antara dua bola, kontak garis terjadi antara dua silinder sejajar, dan kontak elliptical yang paling banyak ditemui dalam aplikasi keteknikan, terjadi ketika dua silinder saling bersilangan, atau dua roda gigi yang saling kontak.

#### **2. 4. 1 Kontak Elastis**

Model kontak elastis dasar ini diperkenalkan oleh Greenwood dan Williamson (1966), yang menemukan bahwa banyak sifat-sifat penting kontak tidak bergantung dari perilaku kekasaran jika distribusi ketinggian *asperity* mengacu pada Gaussian. Pada kasus khusus dari distribusi eksponensial *asperity* yang identik, menunjukkan hubungan antara beban total, panas dan konduktansi kontak listrik dan bidang kontak total yang kesemuanya linear, terlepas dari hukum konstitutif yang menggambarkan proses kontak. Permukaan kasar ditunjukkan oleh berkumpulnya *asperity* dari bentuk referensi yang tersebar dibidang datar. Tingginya puncak mempunyai distribusi statistik dan diasumsikan bahwa cacat asperiti kontak elastis mengikuti teori Hertz. Model GW (1965) menjelaskan bagaimana distribusi Gaussian dapat diterapkan ke parameter permukaan dan alasan untuk kejadian umum bagi distribusi seperti itu, masing-masing membentuk efek individu. Untuk permukaan kasar yang kontak dengan permukaan kaku, model GW yang mengasumsikan ujung radius konstan untuk *asperity* memberikan perkiraan magnitudo yang baik dari besarnya jumlah kontak, daerah kontak riil dan tekanan nominal pada setiap perpisahan.

Beberapa model penting lainnya yang tersedia dalam literatur seperti Greenwood dan model Tripp (Model GT) (1971), Whitehouse dan Archard Model

(Model WA) (1970), Model Onions dan Archard (OA Model) (1973), Model Nayak (1971), Model Hisakado (1974), Model McCool (1986). Pada sebagian besar model, *asperity* diasumsikan berbentuk bola, elips paraboloidal dan solusi Hertzian yang sesuai untuk kontak tunggal yang digunakan dalam analisis. Semua model kecuali model GW dan model Onions menggunakan statistik Nayak (1971) untuk analisisnya. Statistik Nayak dapat digunakan hanya jika profil permukaan dapat dinyatakan dalam bentuk digital yang mungkin terdapat di sebagian besar alat ukur permukaan modern. Namun, parameter yang diperoleh tergantung pada interval pengambilan sampel yang digunakan dalam *digitization*.

#### 2. 4. 2 Kontak Plastis

Periset awal berasumsi bahwa beban normal menyebabkan deformasi elastis hanya terjadi untuk kontak permukaan kasar dan kontak tiap individu yang dapat dijelaskan oleh kontak antara dua daerah Hertzian. Tetapi dua kelemahan utama pemodelan tersebut adalah:

1. Daerah titik kontak tergantung pada radius *asperity* individu yang tidak diketahui.
2. Mereka meramalkan bahwa daerah nyata kontak A adalah sebanding dengan  $P^{2/3}$ , dimana P adalah total beban terapan.

Hukum gesekan Amonton dan Archard, J.F., (1957), mengatakan bahwa gaya gesekan sebanding dengan beban dan tidak tergantung daerah nominal atau kontak yang terlihat. Hal ini berlaku hanya ketika daerah kontak nyata sebanding dengan beban Greenwood, J.A., (1967). Sebelumnya studi eksperimental menunjukkan bahwa peningkatan di daerah kontak sebenarnya disebabkan peningkatan titik kontak, dengan ukuran rata-rata titik kontak yang tersisa lebih kurang konstan untuk cahaya dan beban menengah. Archard (1957) menunjukkan bahwa suatu permukaan dengan *asperity* bola dari ketinggian yang berbeda akan menampilkan hubungan *linier* sekitar, antara beban dan daerah kontak sebenarnya baik berdasarkan kontak elastis atau plastis. Studi Tsukizoe dan Hisokado (1965) berdasarkan pada distribusi normal *asperity* dan *asperity* diasumsikan berbentuk kerucut dengan sudut dasar yang sama. Mereka memiliki hubungan teoritis antara

kontak daerah nyata dan pemisahan untuk daerah plastis ideal. Pullan dan Williamson (1972) menyimpulkan dari hasil eksperimen mereka bahwa volume kekal dalam daerah plastis dan material di luar daerah kontak dinaikkan oleh jumlah seragam. Halling dan Nuri (1975) melihat bahwa kekerasan bukanlah suatu material yang konstan, melainkan bervariasi karena pekerjaan pengerasan material.

Woo dan Thomas (1980) dari percobaan mereka berdasarkan teori kontak plastis membuat kesimpulan-kesimpulan berikut.

1. Sebenarnya daerah kontak dengan beban meningkat terutama karena jumlah *microcontacts* akan meningkat dengan beban, meskipun ukuran meannya akan tetap konstan.
2. Distribusi ukuran kontak kira-kira log-normal.
3. Pemisahan dari permukaan kira-kira berbanding terbalik dengan logaritma dari beban.
4. Kepadatan dan ukuran rata-rata mikro-kontak dapat bervariasi beberapa kali lipat magnitudo untuk permukaan yang berbeda pada beban yang sama.

Moore (1949) memeriksa kontur depresi pada permukaan tembaga yang dibuat oleh *indenter* silinder yang menunjukkan bahwa meskipun sebagian besar deformasi yang cukup besar telah terjadi, *asperity* relatif sedikit cacat. Dia menyimpulkan kejadian *asperity* terjadi karena pekerjaan pengerasan material. Greenwood dan Rowe (1965) mengamati hasil yang sama. Mereka menekan permukaan kasar bawah silinder aluminium (yang panjangnya hampir sama dengan diameter) dengan sebuah pelat baja datar ringan dan terjadi sedikit deformasi dari *asperity*, meskipun ada deformasi massal setinggi 10% dari panjangnya. Jika deformasi plastis hanya terbatas pada material massal, maka *asperity* mempertahankan bentuk aslinya begitupun dengan *asperity* rata ketika zona plastis meluas ke *interference* (perpindahan).

Chang *et al.* (1987) memberikan model plastis elastis (ECB model) untuk menganalisis kontak permukaan kasar. Model ini berdasarkan pada konservasi volume dari kontrol volume *asperity* selama deformasi plastis. Model ini berlaku

terutama untuk kontak beban menengah dimana deformasi *asperity*nya elastis, tetapi ada juga merupakan persentase yang cukup *asperity* melampaui batas elastis plastis.

Dalam model kekasaran deformasi elastis murni atau plastis murni dan model tertukar antara dua model. Pertukaran adalah nilai-nilai gangguan kritis, yang diperkirakan dari persamaan daerah plastis, tegangan dan tegangan Hertzian maksimum Greenwood, J.A., *et al.* (1966). Pertukaran serupa digunakan oleh Majumdar dan Bhushan (1991) yang diterapkan pada faktor geometri untuk menggambarkan fitur geometris dari kekasaran permukaan. Tekanan di area kontak yang diperkirakan oleh solusi elastis mungkin berlebihan dan akibatnya nilai gangguan kritis juga berlebihan. Evseev *et al.* (1991) dalam model plastis elastik telah mengambil asumsi dari model GW sebagai berikut.

1. Permukaan kasar isotropik.
2. Bola asperiti dekat dengan puncaknya.
3. Semua asperiti memiliki jari-jari R yang sama tapi ketinggiannya acak.
4. Tidak ada interaksi antara asperiti ketika mereka terpisah jauh.
5. Ada deformasi massal, hanya jika asperiti berubah menjadi cacat selama kontak.

Dua referensi bidang dapat didefinisikan antara kontak permukaan kasar. Salah satunya adalah mean dari ketinggian asperiti dan lainnya adalah mean dari ketinggian permukaan. Yang kedua adalah lebih praktis, karena dapat diperoleh secara eksperimental. Jika  $z$  dan  $d$  menunjukkan ketinggian *asperity* dan pemisahan permukaan, masing-masing, yang diukur dari bidang referensi didefinisikan oleh mean dari ketinggian permukaan asli, *interference* didefinisikan sebagai  $\omega = z - d$ . Hanya *asperity* dengan *interference* positif memiliki kontak. Selama pembebanan, setiap *asperity* akan mengalami deformasi yang terjadi karena  $\omega$  dan diasumsikan bahwa tidak ada interaksi antara *asperity*, total beban dapat dianggap sebagai jumlah dari komponen plastis dan elastis.

Untuk kontak elastis Greenwood, J.A., *et al.* (1966), beban kontak dari kekasaran adalah bentuk.

$$P(\omega) = \frac{4}{3} E^* R^{0,5} \omega^{1,5} \quad (2.1)$$

dimana  $E^*$  adalah modulus efektif.

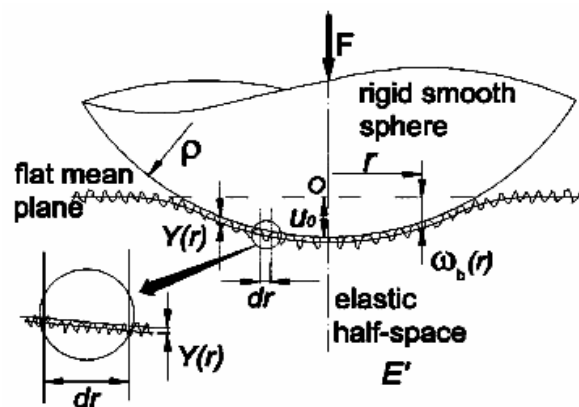
Permukaan asperiti mengalami deformasi plastis ketika nilai  $\omega$  melebihi  $\omega_c$ , di mana  $\omega_c$  adalah interferensi kritis yang sesuai dengan terbentuknya deformasi plastis. Hal ini diberikan oleh Chang, W.R., *et al.* (1987)

$$\omega_c = \left( \frac{\pi K H}{2 E^*} \right)^2 R \quad (2.2)$$

di mana  $H$  adalah kekerasan dari material yang lebih lunak dan  $K$  adalah koefisien kekerasan. Ketika  $\omega < \omega_c$ , kontakannya elastis. Ketika  $\omega \geq \omega_c$ , kontakannya plastis. Evseev *et al.* (1991) dari hasil eksperimen mereka menyimpulkan bahwa  $\omega_c$  adalah fungsi kekerasan dan diberikan oleh

$$\omega_c = \gamma \left( \frac{H}{E^*} \right)^2 R \quad (2.3)$$

dimana koefisien  $\gamma$  ditentukan secara eksperimental sebagai fungsi dari tingkat baja.



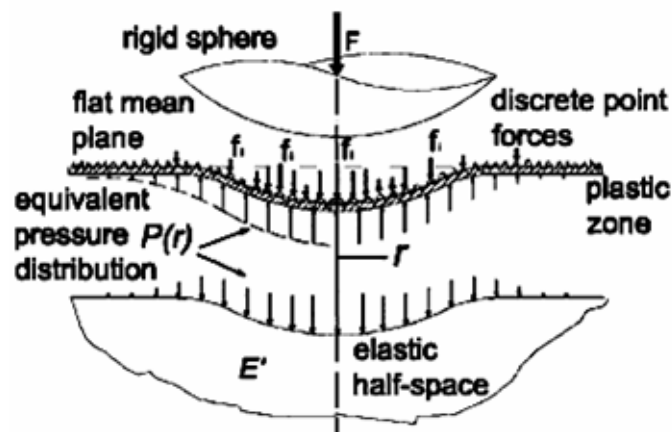
Gambar 2. 4 Deformasi *plastic* pada *asperity* (Johnson, K. L., 1985)

Modus deformasi asperiti diasumsikan plastis. Dengan asumsi microcontacts terdeformasi plastis, Cooper *et al.* (1969) mendapatkan hubungan untuk bidang kontak nyata dari kontak permukaan kasar

$$\frac{A_f}{A_a} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \lambda \quad (2.4)$$

dimana  $\lambda = Y/\sqrt{2\sigma}$ ,  $Y$ , dan  $\operatorname{erfc}(\lambda)$  adalah pemisahan nondimensi, pemisahan antara mean bidang rata, dan fungsi error pelengkap, berturut-turut.

Deformasi *substrat* diasumsikan elastis. Geometri kontak ditunjukkan pada Gambar. 2.4. Semua deformasi *bulk* diasumsikan terjadi pada ruang-setengah elastis yang memiliki modulus elastisitas efektif  $E'$ . Gaya titik diskrit terjadi pada titik kontak dimana tekanan *microhardness* dari kehalusan dari dua bahan yang bertemu. Kekasaran permukaan bertindak seperti lapisan plastis pada ruang-setengah elastis, dalam artian bahwa pengaruh titik gaya ini pada ruang-setengah elastis dianggap sebagai tekanan berkelanjutan  $P(r)$ . Diagram skematik benda bebas dari kontak ditunjukkan pada Gambar. 2.5. Sebagai akibat dari kelengkungan permukaan, pemisahan dan akibatnya ukuran rata-rata dan jumlah *microcontacts* bervariasi dengan posisi radial. Di permukaan elemen yang sangat kecil  $dr$ , pemisahan lokal  $Y(r)$  seragam. Oleh karena itu, hubungan kontak kasar sesuai dengan Persamaan (2.4)



**Gambar 2. 5 Diagram kontak benda bebas, gaya titik diskrit dan lapisan plastis (Johnson, K. L., 1985)**

Kucharski *et al.* (1944) mengusulkan sebuah model elemen hingga untuk *asperity* yang berdeformasi secara elastoplastis, dimana area kontak nyata (RCA) versus hubungan dengan beban tanpa dimensi dievaluasi secara numerik dari permukaan E60 yang menunjukkan pengulangan dengan mengabaikan dispersi dari distribusi parameter tinggi puncak, yang tidak mempengaruhi hubungan beban versus RCA. Prediksi teoretis model elemen hingga menunjukkan kesesuaian yang baik dengan hasil eksperimen yang diperoleh untuk permukaan *sand blast*, terutama dalam area kontak beban nyata. Timbulnya permukaan non-kontak mungkin akan mengakibatkan peningkatan area kontak, mengurangi gap pengamatan sebenarnya. Namun demikian hasil dari model elemen hingga disajikan jauh lebih dekat dengan eksperimental daripada hasil dari GW dan model CEB.

Mesarovic dan Fleck (2000) memberikan kontak normal tanpa gesekan dari bola elastis plastis kaku dan bola dengan menggunakan metode elemen hingga. Mereka memetakan indentasi bagi indentasi normal tanpa gesekan dari bola yang mampu berdeformasi, dan untuk indentasi bola yang mampu berdeformasi dengan bola yang kaku. Mereka menyimpulkan bahwa batas antara elastis dan plastis elastis tidak bergantung pada ukuran relatif dari bola dan eksponen pengerasan regangan. Batas antara yang elastis plastis dan rezim serupa tergantung pada tingkat pengerasan regangan dan tidak tergantung pada ukuran relatif bola. Posisi rezim deformasi hingga tergantung baik pada tingkat regangan pengerasan ataupun ukuran relatif bola.

Abdo dan Farhang (2005) memberikan rumusan matematis kontak plastis elastis dari permukaan kasar. Menggunakan definisi gangguan kritis, konsep *asperity* elastis dan plastis telah dikembangkan dimana permukaan kasar diwakili oleh dua permukaan. Permukaan pertama adalah permukaan fisik sebenarnya dan diasumsikan sebagai *body* elastis murni. Permukaan kedua adalah fiktif dan berasal dari permukaan fisik dan *interference* kritis. Permukaan ini diasumsikan berdeformasi sebagai *body* plastis murni. Perkembangan permukaan plastis dan elastis telah membantu perumusan matematis kontak plastis elastik pada permukaan kasar. Deformasi *asperity* plastis dibuat untuk mengikuti hukum kekekalan volume. Model ini memberikan tampilan yang lebih akurat tentang

perilaku permukaan elastis plastis pada kontak dan dapat memodelkan formulasi yang melibatkan kekasaran permukaan kontak.

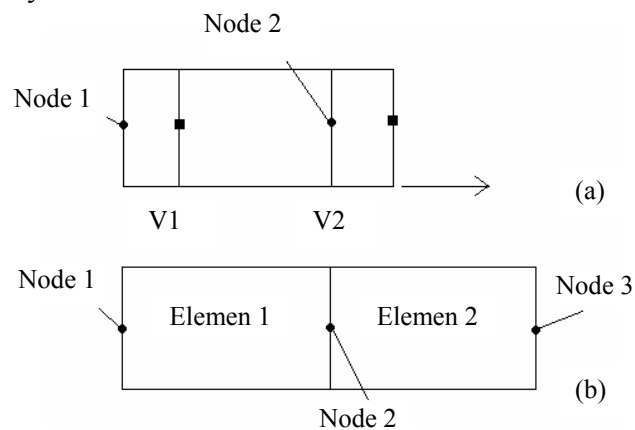
Perbandingan hasil numerik untuk memperkirakan bidang kontak sebenarnya dan gaya kontak menggunakan model ini dan metode sebelumnya Chang, W.R. *et al.* (1987) dan Kucharski, S. *et al.* (1994) menunjukkan bahwa model ini memberikan prediksi yang lebih realistis dari perilaku kontak elastis-plastis. Azushima *et al.* (2006) mengamati deformasi *asperity* pada spesimen dengan permukaan kasar dari proses indentasi dan *upsetting* aluminium disk. Percobaan dilakukan tanpa pelumas dan dengan pelumas. Dari pengamatan mereka, perubahan bagian bidang kontak riil diukur dengan prosesor gambar. Perbandingan kontak pada percobaan *upsetting* dan indentasi tanpa pelumas meningkat secara linier dengan meningkatnya tegangan normal sampai tingkat 120 MPa. Pada tingkat ini, bidang kontak yang sebenarnya dalam *upsetting* meningkat dengan cepat dan di sisi lain, perbandingan pada indentasi meningkat secara linier dengan meningkatnya tegangan sampai tingkat sekitar 300 MPa. Bidang kontak yang sebenarnya setelah eksperimen *upsetting* dan indentasi dengan membatasi pelumas mencapai nilai sekitar 60%.

Zhao *et al.* (2000) memberikan model mikro kontak *asperity* dengan menggabungkan transisi dari deformasi elastis-plastis ke dalam aliran penuh. Ketergantungan mean kontak tekanan dan area kontak dari *asperity* pada gangguan kontak dalam rezim transisi *elastoplastic* dimodelkan oleh logaritmik dan fungsi polinom empat orde. Hubungan untuk perbandingan kontak *elastoplastic* dari *asperity* memainkan peranan penting dalam perilaku makro-kontak permukaan kasar. Pemisahan mean yang lebih kecil dan daerah sebenarnya yang lebih besar diperkirakan oleh model ini, dibanding model GW pada indeks plastisitas dan beban kontak. Hasilnya sesuai dengan intuisi fisik dan pengamatan eksperimental. Berdasarkan hasil perbandingan dan analisa, model yang sekarang ditampilkan lebih lengkap dari kedua model CEB dan model GW dalam menggambarkan fenomena elastik-plastis antar kontak permukaan kasar.

## BAB 3 PEMODELAN ELEMEN HINGGA

### 3.1 Teori Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga (*finite element method*) merupakan cara yang sangat baik untuk menentukan tegangan dan defleksi dalam konstruksi yang sulit diselesaikan secara analitik. Pada metode ini konstruksi dibagi menjadi jaringan yang terdiri dari elemen kecil yang dihubungkan satu sama lainnya pada titik node. Analisa elemen hingga dikembangkan dari metode matriks untuk analisa struktur dan ditunjang oleh komputer digital yang memungkinkan diselesaikannya sistem dengan ratusan persamaan simultan. Kemajuan akhir-akhir ini dalam bidang grafik komputer dan komputer raksasa memacu penerapan metode elemen hingga dalam rekayasa.



**Gambar 3.1** Analisa *finite element method*

Konsep yang disederhanakan dapat dilihat pada gambar 3.1. Pada Gambar 3.1 (a) nampak elemen dua node berdimensi satu yang sederhana. Setiap node memiliki satu derajat kebebasan bila digeser sejauh  $U_1$  dan  $U_2$ . Persamaan yang menyatakan hubungan antara gaya yang bekerja pada node dan pergeseran yang diakibatkannya adalah sebagai berikut:

$$P_1 = k_{11}U_1 + k_{12}U_2$$

$$P_2 = k_{21}U_1 + k_{22}U_2$$

Analisa elemen hingga mula-mula dikembangkan untuk situasi dua dimensi (tegangan bidang). Suatu konstruksi tiga dimensi akan mengakibatkan bertambahnya jumlah persamaan simultan, tetapi dengan memanfaatkan elemen tingkat tinggi dan komputer yang lebih cepat, soal soal tersebut dapat diselesaikan dengan FEM.

### 3. 1. 1 Konsep Dasar Analisa FEM

- a. Menjadikan elemen-elemen diskrit untuk memperoleh simpangan-simpangan dan gaya-gaya anggota dari suatu struktur.
- b. Menggunakan elemen-elemen kontinum untuk memperoleh solusi pendekatan terhadap permasalahan-permasalahan perpindahan panas, mekanika fluida dan mekanika *solid*.

### 3. 1. 2 Prosedur Analisa Struktur

- a. Membagi struktur menjadi elemen-elemen terhitung (elemen dengan nodal).
- b. Memberikan sifat-sifat fisik pada tiap elemen.
- c. Hubungkan elemen-elemen pada tiap nodal untuk membentuk sebuah sistem perkiraan dari persamaan untuk struktur tersebut.
- d. Menyelesaikan sistem persamaan tersebut yang disertai dengan jumlah yang tidak dikenal di titik simpul (contoh: perpindahan).
- e. Hitung jumlah yang diinginkan (contoh: *strains* dan *stresses*).

### 3. 1. 3 Implementasi-implementasi pada Komputer

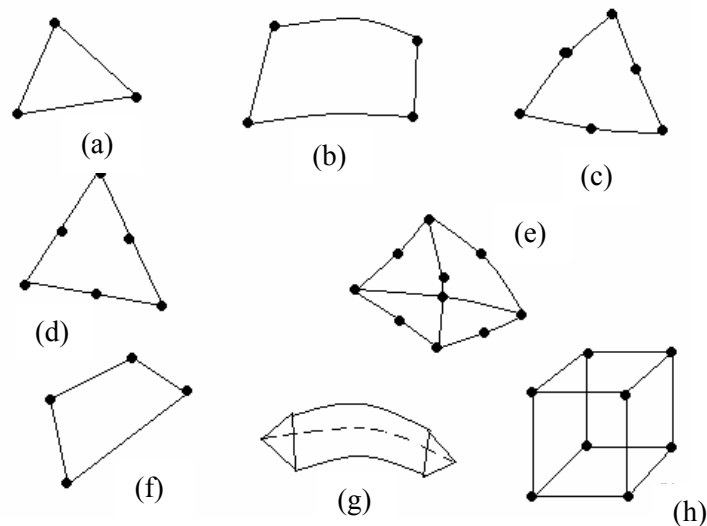
- a. Preprocessing (membuat *FE model*, *loads* dan *constraints*).
- b. FEA solver (merakit dan penyelesaian sistem persamaan).
- c. Postprocessing (menampilkan hasil).

### 3. 1. 4 Jenis Elemen pada FEM

Elemen satu dimensi (garis), Jenis elemen ini meliputi pegas (*spring*), *truss*, *beam*, *pipe* dan lain sebagainya, seperti terlihat pada Gambar 3.2.

Elemen segitiga dasar nampak pada gambar 3.2a Bentuk ini merupakan elemen dua dimensi yang paling sederhana, selain itu juga paling banyak

dimanfaatkan. Susunan segitiga selalu dapat berwujud domain berdimensi dua. Segitiga dengan enam node (b) meningkatkan derajat kebebasan yang terdapat dalam model. Elemen kuadrilateral (c) merupakan kombinasi dua segitiga dasar.



**Gambar 3. 2 Elemen yang lazim digunakan pada analisa FEM**

Penggunaannya dapat mengurangi jumlah elemen untuk membentuk model tertentu. Elemen (d) dan (e) berdimensi tiga akan tetapi hanya memerlukan dua variabel independen untuk menggambarkannya. Elemen tersebut digunakan untuk soal dengan simetri aksial dalam koordinat silindris, Gambar 3.2d adalah elemen cincin berdimensi satu dan (e) merupakan elemen segitiga berdimensi dua. Model FEM berdimensi tiga sebaiknya disusun dari elemen isoparametrik dengan sisi lengkung. Gambar 3.2f merupakan segitiga isoparametrik; (g) adalah *tetrahedron*; dan (h) adalah *heksahedron*. Elemen ini sangat bermanfaat bila diperlukan pendekatan batas daerah lengkung dengan jumlah elemen minimal.

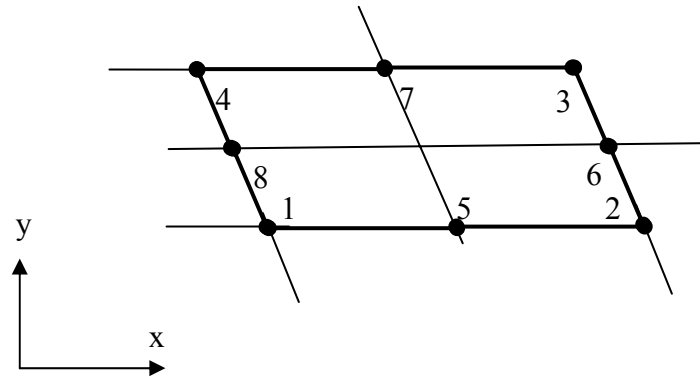
### 3. 1. 5 Fungsi Elemen pada FEM Mengacu pada *Polynomial*

Permasalahan fisik dibuat elemen-elemen kecil. Elemen-elemen tersebut ditandai dengan nomor elemen dan nomor titik nodal, termasuk juga harga-harga koordinat.

- a. Tentukan persamaan pendekatannya, *linear* atau *quadratic*.  
Persamaan-persamaan tersebut harus ditulis dalam bentuk harga-

harga nodal yang belum diketahui. Ini berlaku untuk setiap elemen, artinya setiap elemen harus didefinisikan.

- b. *Quadratic* digunakan untuk permasalahan dua dimensi yang membutuhkan keakuratan tinggi dalam menganalisa model.



**Gambar 3. 3 Elemen *quadratic***

Penyelesaian elemen hingga mencakup perhitungan matriks kekakuan untuk setiap elemen dalam struktur. Elemen tersebut kemudian dirakit membentuk matriks kekakuan  $[K]$  untuk seluruh konstruksi.

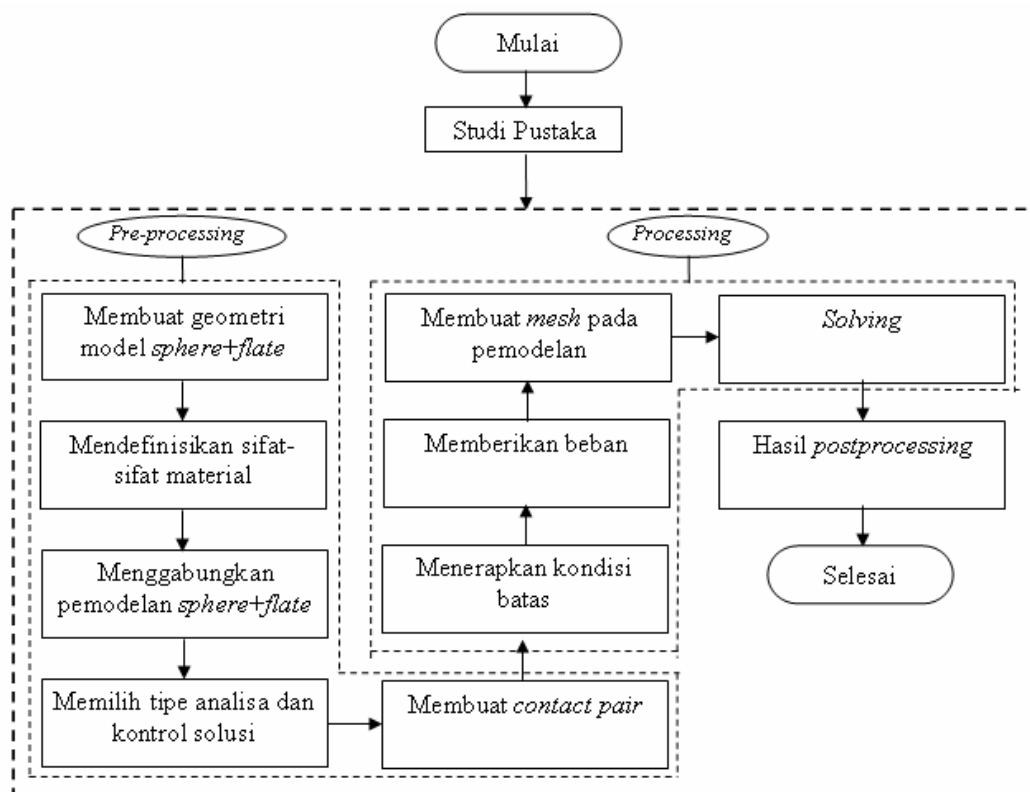
$$\{P\} = [K] \{U\} \quad (3.1)$$

Matriks gaya diketahui oleh karena terdiri dari nilai numeric beban dan reaksinya yang dihitung sebelum permulaan analisa elemen hingga. Pergeseran ( $u$ ) tidak diketahui dan diselesaikan dengan menggunakan persamaan untuk menghitung pergeseran semua node. Bila hasil ini dikalikan dengan matriks koordinat posisi node  $[B]$  matriks konstanta *elastic*  $[D]$  maka diketahui besar tegangan pada setiap titik nodal.

$$\{\sigma\} = [D] [B] \{U\} \quad (3.2)$$

Bagian yang rumit dari penyelesaian elemen hingga adalah persiapan data masukan. Topologi jaringan elemen harus dilukiskan dalam program komputer dengan nomer elemen dan nomer node yang berhubungan dengan setiap elemen. Semua informasi ini disusun dalam table sangat rumit dan mudah membuat kesalahan terutama bila konstruksi terdiri dari ratusan node. Untunglah, perkembangan teknologi modern telah dapat mengatasi problema tersebut dan selama itu telah memperluas penggunaan metode elemen hingga. Prosesor awal memungkinkan ditidihkannya jaringan elemen pada gambar konstruksi dan koordinat node dan hubungan antar elemen dapat dimasukkan secara otomatis. Komputer pada proses lanjut menampilkan hasil analisa elemen hingga dalam bentuk grafik, dengan demikian pemakai dengan cepat dan mudah mengevaluasi informasi tanpa harus menganalisa data cetak numerik yang tak terhitung jumlahnya.

### 3.2 Flow Chart Pemodelan dalam FEM ANSYS 9.0

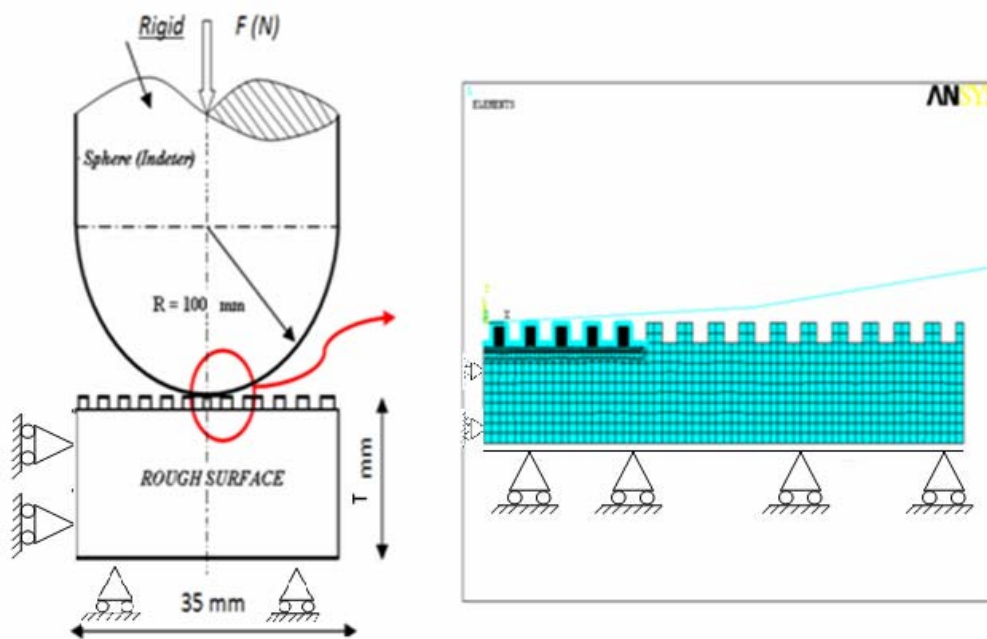


**Gambar 3. 4 Flow chart pemodelan dalam FEM ANSYS 9.0**

### 3.3 Spesifikasi Masalah

Model kontak yang dipakai adalah *rigid sphere* yang memiliki jari-jari sebesar  $(R) = 100$  mm. Modulus elastisitas material  $(E) = 200$  GPa, *yield strength*  $(Y) = 0,9115$  GPa dan *Poisson's ratio*  $(\nu) = 0.32$ . Sedangkan *deformable flat* mempunyai modulus elastisitas material  $(E) = 97$  GPa, *yield strength*  $(Y) = 0,341$  GPa dan *Poisson's ratio*  $(\nu) = 0.34$ . Awalnya *sphere* dengan *roughness surface* ini saling kontak pada suatu titik kontak. Sphere kemudian memberi beban sebesar  $P$  pada titik pusat seperti terlihat pada Gambar 3.5 dibawah ini.

*ANSYS 9.0* digunakan untuk memecahkan permasalahan kontak (*contact*) antara *sphere* dengan *roughness surface* di atas. Keduanya tersebut dimodelkan dengan seperempat lingkaran yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.



**Gambar 3.5** Deskripsi kondisi batas tumpuan

Pada Gambar 3.5 dipresentasikan kondisi batas yaitu pada sumbu  $x$  dan sumbu  $y$ . *Nodal* yang terletak pada sumbu  $x$  atau *nodal* pada bagian bawah dari bola tidak dapat bergerak dalam arah sumbu  $x$  dan tidak dapat bergerak dalam arah  $y$  (*rigid*). Begitupun *nodal* pada sumbu simetri dari bola tidak bisa bergerak dalam arah sumbu  $x$  dan  $y$ . Secara umum pemecahan masalah di atas dengan

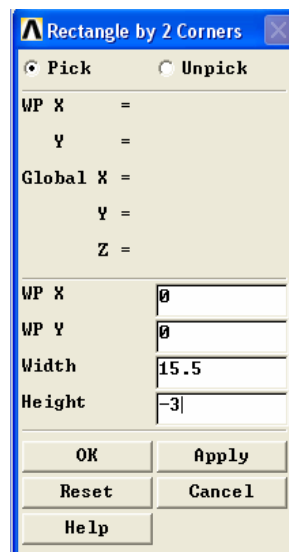
menggunakan *ANSYS 9.0* terdiri dari: proses *pre-processing*, solusi (*solution*) dan *post-processing*.

### 3.4 Proses *Pre-Processing*

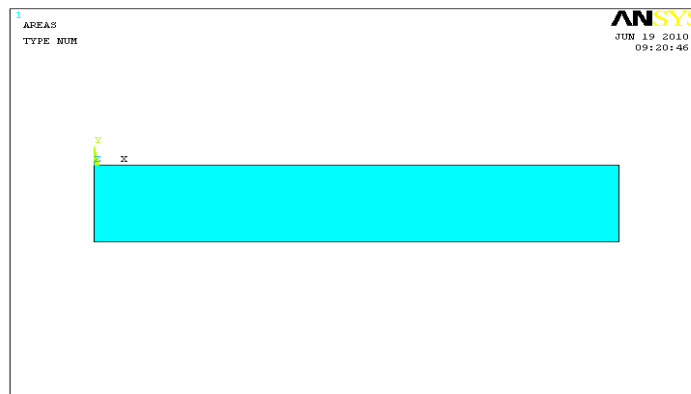
#### 3.4.1 Penentuan Area

Pemodelan dilakukan dengan membuat *areas* seperti pada Gambar 3.5 Berikut langkah pembuatan geometri yang terdiri dari membuat benda kerja awal (*Specimen*) Berikut ini langkah pembuatan *keypoints*:

1. Dari *ANSYS Main menu* dengan memilih *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By Corners*, seperti pada Gambar 3.6 dibawah ini. selanjutnya masukkan nilai  $Wpx = 0$ ,  $Wpy = 0$ , *Width* (lebar *Specimen*) = 15.5 mm, dan *Height* (tebal *Specimen*) = 3 mm, lalu klik OK akan muncul hasil plot area pada Gambar 3.7.



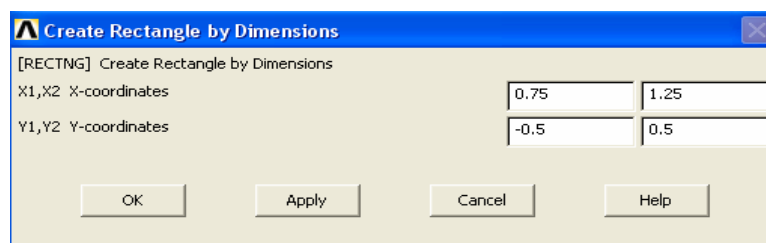
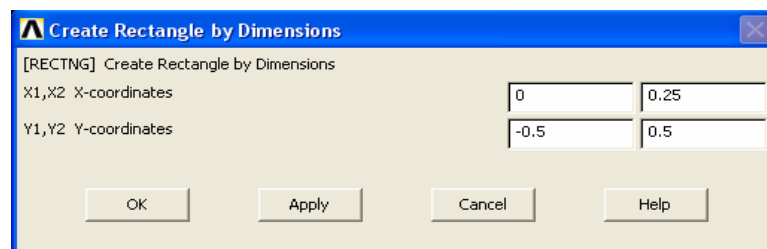
Gambar 3.6 Menu *rectangle by corners*

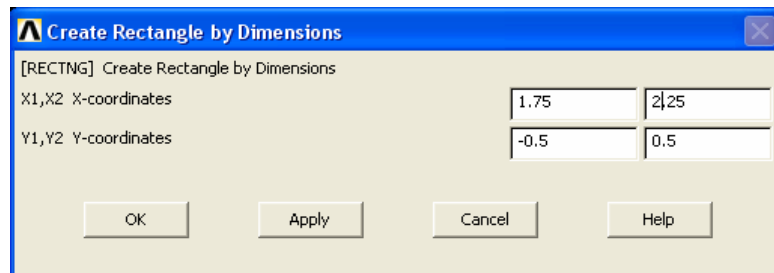


**Gambar 3. 7 Plot area 1**

2. Untuk membuat bagian puncak asperity klik Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Retangele > By Dimensions.

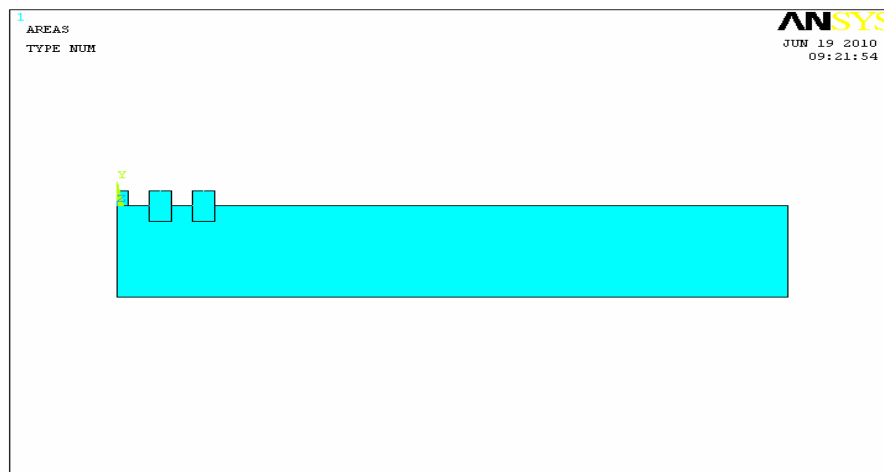
Klik *Retangele > By Dimensions*, masukkan nilai koordinat X1,X2 dan koordinat Y1,Y2 , seperti ukuran yang telah ditentukan yaitu jarak antar puncak asperity 0.5 mm yang terlihat pada gambar 3.8 di bawah ini.





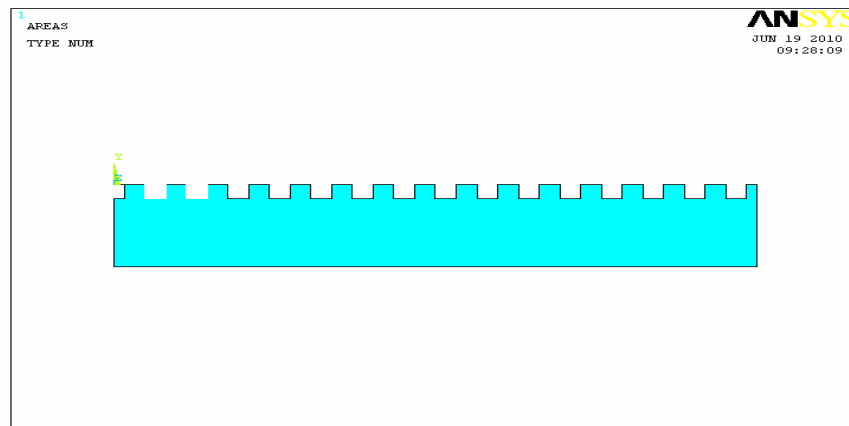
**Gambar 3. 8 Menu create rectangle by dimensions**

3. Untuk mengcopy daerah yang akan diSubtract klik *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Copy > Areas >*, klik antar kotak maka akan timbul menu pada gambar 4.9.masukan nilai *Number of copies* 14 dan *X Offset in active Cs* 1.



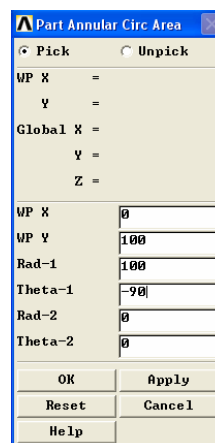
**Gambar 3. 9 Copy area 1**

4. Melakukan substract yaitu *area 1* dengan *area 2*. Dari *ANSYS Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operated > Booleans > Subtract > Areas*. (Klik area bagian bawah (*Areas*) kemudian klik OK dilanjutkan pada bagian atas yang berupa kotak-kotak kecil klik OK.
5. Klik *area 1* seperti pada Gambar 3.10 sebagai *area* yang akan dikurangi dengan *area 2* kemudian klik *OK*.
6. Kemudian klik *area 2* seperti pada Gambar 3.10, dan klik *OK*. Selanjutnya akan terlihat tampilan hasil Substraction pada Gambar 3.10.

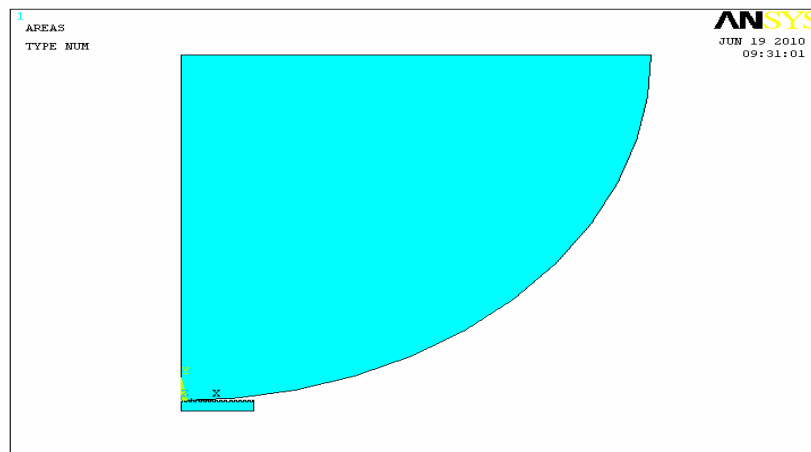


**Gambar 3. 10 Plot subtraction area 1 dengan area 2**

7. Untuk membuat  $\frac{1}{4}$  lingkaran sebagai penekan benda kerja klik *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Partia Annulus*. Kemudian masukkan nilai pada *Part Annular Circ Area* Dari Gambar 3.11, masukkan nilai 0 pada *WP-X* dan *WP-Y*, 100 pada *Rad-1* 100 dan *Rad-2*, 0 pada *Theta-1* -90 dan 0 pada *Theta-2*. Maka dihasilkan *area 2* seperti pada Gambar 3.12 pada bagian dibawah ini.
8. Untuk mempermudah langkah pemodelan karena bagian atas *Rigid* dari *ANSYS Main menu* dengan memilih *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete Only*, kemudian klik bagian  $\frac{1}{4}$  bola (*rigid*).
9. Untuk melihat hasil *line* dari *area* yang dihasilkan dari *utility menu* pilih *Plot Lines*, maka akan tampil line seperti pada Gambar 3.13.

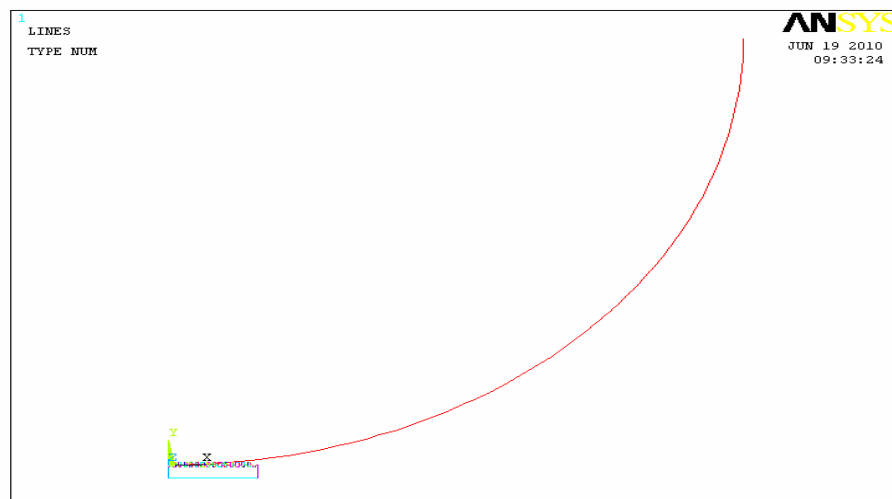


**Gambar 3. 11 Menu part annular circ area**



**Gambar 3. 12 Plot area 1 dan area 2**

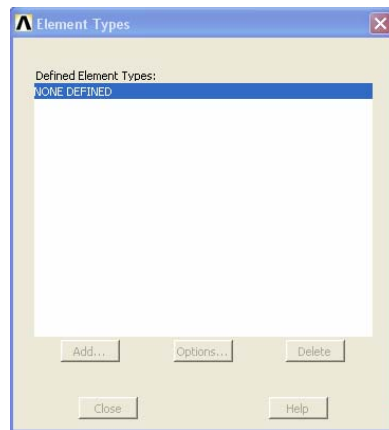
10. Dari *ANSYS Main menu* dengan memilih *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete Only > Line Only* klik bagian garis vertical dan horizontal pada gambar  $\frac{1}{4}$  lingkaran lalu klik OK.
11. Untuk langkah awal permodelan *Rigit* untuk benda yang berbentuk *Axisymmetric* hanya digunakan *line*  $\frac{1}{4}$  lingkaran luarnya saja seperti terlihat pada gambar 3.13 dibawah ini.



**Gambar 3. 13 Hasil dari plot lines dan arcs**

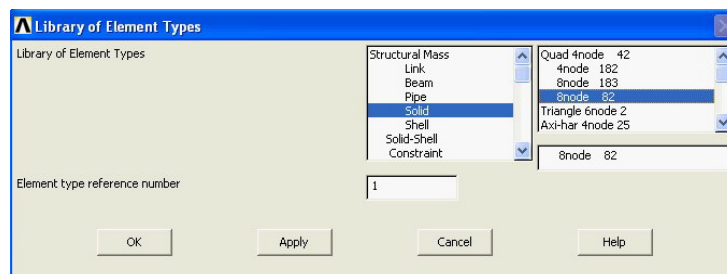
### 3. 4. 2 Penentuan Tipe Elemen

1. Dari ANSYS Main menu pilih Main menu > Preprocessor > Elemen Type > Add/Edit/Delete > Add. Maka akan tampil menu Element types seperti pada Gambar 3.14.



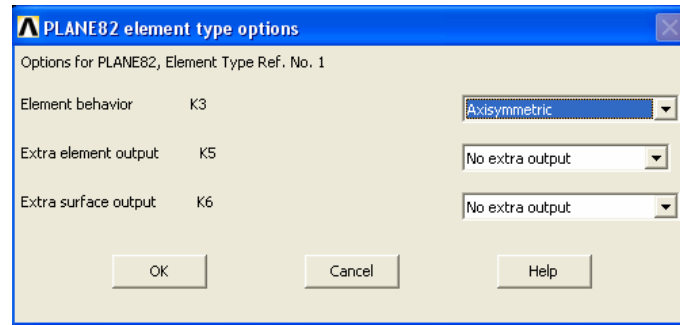
Gambar 3. 14 Menu *element types*

2. Dari Gambar 4. klik *Add*. Maka akan tampil menu *Library Of Element Types* seperti pada Gambar 3.15.



Gambar 3. 15 Menu *library of element types*

3. Dari Gambar 3.15, pilih *Structural Mass Solid* pada *listbox* sebelah kiri dan pada *listbox* sebelah kanan pilih *Tet 8nodal 82*, kemudian klik *OK*.
4. Dari Gambar 3.15 klik *Options*. Maka akan tampil menu *PLANE82 Of Element Types Options*, lalu Elemen behavior dengan *Axisymetrik* seperti pada Gambar 3.16.

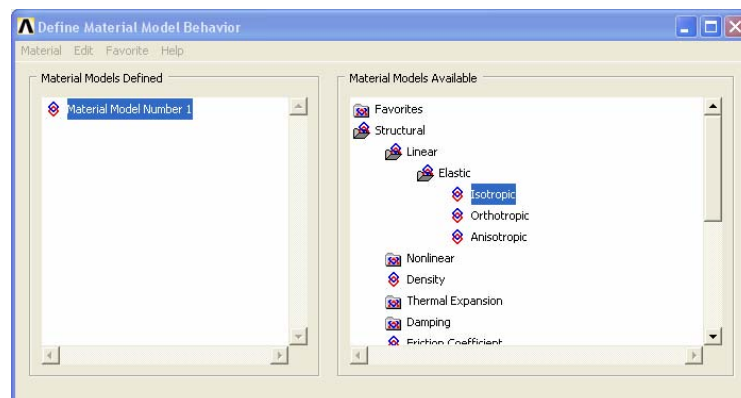


**Gambar 3. 16** Menu *element types*

### 3. 4. 3 Penentuan Sifat Material (*Material Property*)

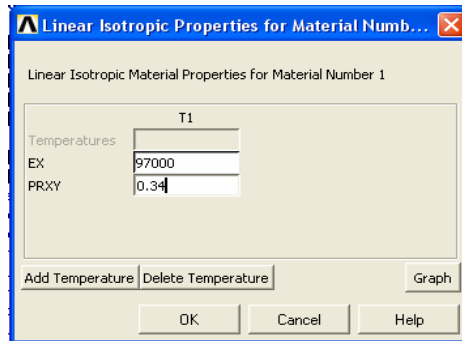
Material yang digunakan adalah *elastic-perfectly plastic*. Berikut ini langkah memasukkan data material *linear elastic*:

1. Dari ANSYS Main menu pilih Main menu > Preprocessor > Material Models, maka akan tampil menu Define Material Model Behaviour seperti pada Gambar 3.17.



**Gambar 3. 17** Menu *define material model behaviour*

2. Dari Gambar 3.17 pada *listbox* sebelah kanan pilih *Structural* > *Linear* > *Elastic* > *Isotropic*, kemudian akan muncul menu *Linear Isotropic Properties for Material Numb* seperti pada Gambar 3.18.

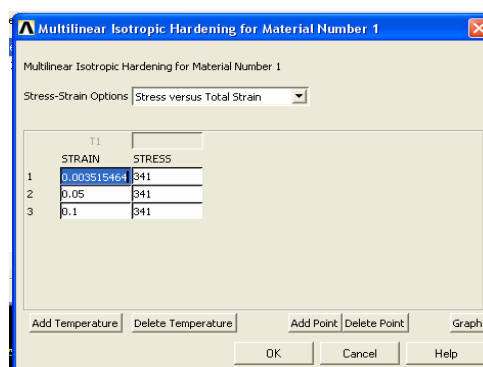


**Gambar 3. 18** Menu *linear isotropic properties for material numb*

3. Dari Gambar 3.18 masukkan nilai modulus elastisitas pada  $EX = 97$  GPa dan *Possion's ratio* pada  $PRXY = 0.34$ .
4. Kemudian klik OK dan close menu Define Material Model Behavior.

Dan berikut ini langkah memasukkan data material *perfectly plastic*:

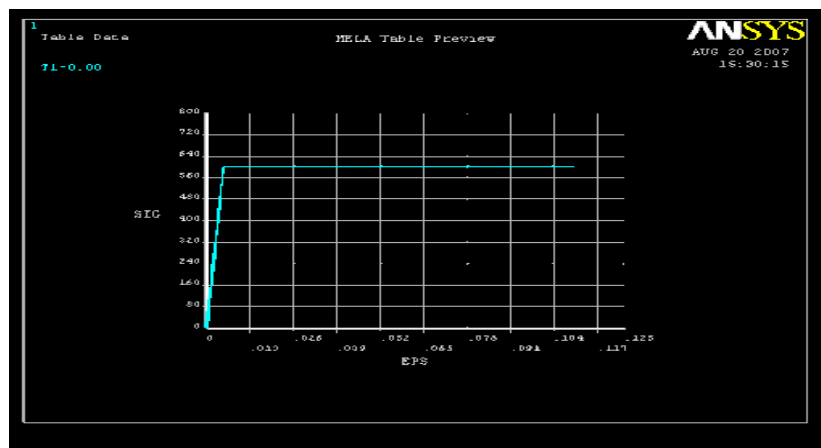
1. Dari ANSYS Main menu pilih Main menu > Preprocessor > Material Models. Kemudian menu Define Material Model Behavior.
2. Dari Gambar 3.17 pada listbox sebelah kanan pilih Structural > NonLinear > Inelastic > Rate Independent > Isotropic Hardening Plasticity > Mises Plasticity. Kemudian akan muncul menu Multilinear Esontropik Hardening For Number 1 seperti pada Gambar 4.19.



**Gambar 3. 19** *Multilinear esontropik hardening for number 1*

3. Dari Gambar 3.19 masukkan data regangan pada kolom *STRAIN* dan tegangan pada kolom *STRESS*. Untuk menambah kolom klik *Add point*.
4. Klik *OK* pada Gambar 3.19 dan tutup menu *Define Material Model Behavior*.

Berikut ini adalah properti material yang digunakan dalam hubungan tegangan-regangan:



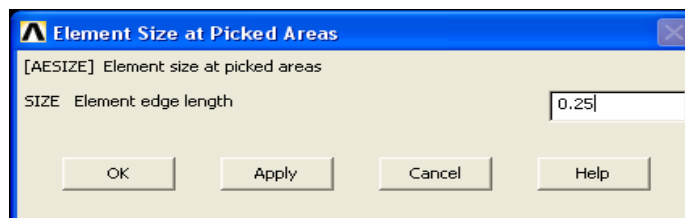
**Gambar 3. 20** Plot kurva tegangan-regangan *multilinear esotropik hardening*

#### 3. 4. 4 Meshing

Proses *meshing* merupakan proses membagi komponen dalam elemen-elemen kecil.

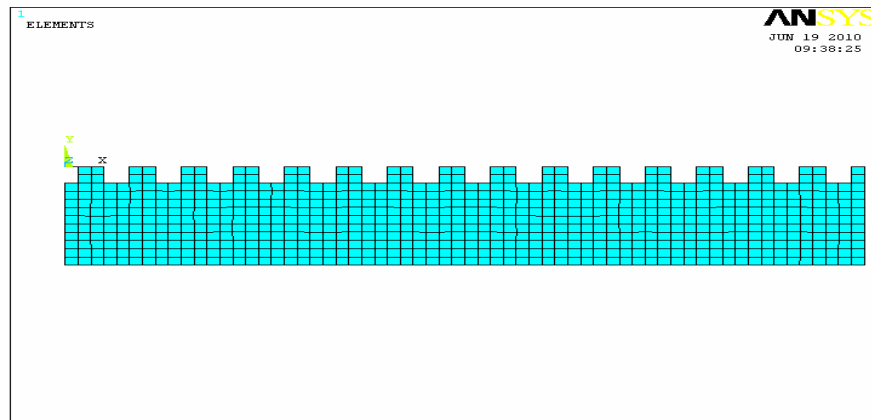
Berikut ini langkah dalam melakukan *meshing*, yaitu:

1. Dari *ANSYS Main menu* pilih *Main menu > Preprocessor > Meshing > Size cntrls > Manual Size > Areas > Picked Areas*, kemudian klik *Areas* seperti pada Gambar 3.21, masukkan nilai pada *Size Element Edge Length* 0.25.



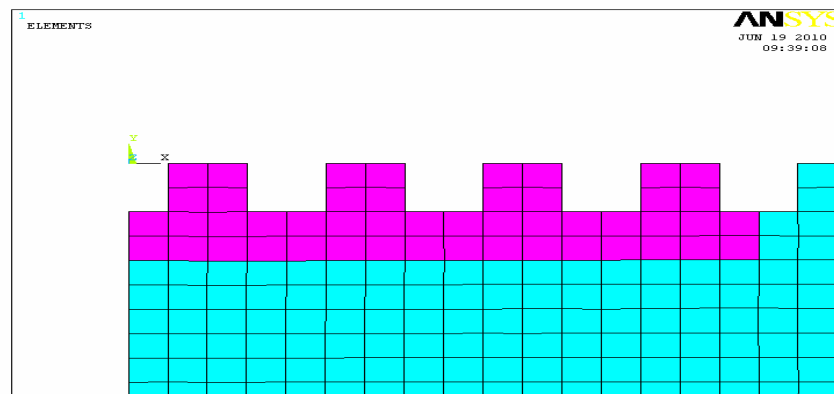
**Gambar 3. 21** Menu *element size at picked areas*

2. Pilih *Main menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Free>*, kemudian klik *Areas* seperti pada Gambar 4.22:

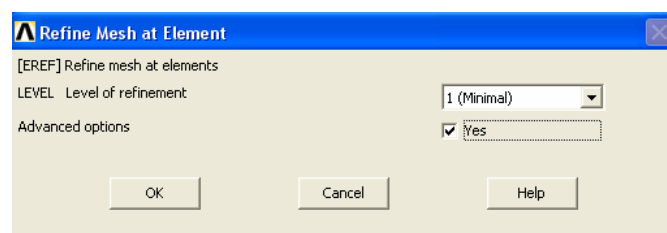


**Gambar 3. 22** *Areas* hasil pembagian *element*

3. Untuk *Areas* yang kemungkinan terkena *Kontak* dari ANSYS *Main menu* pilih *Main menu > Preprocessor > Meshing > Modify Mesh > Rfine At > Areas> Elemen*, kemudian klik *Element* seperti pada Gambar 3.23:

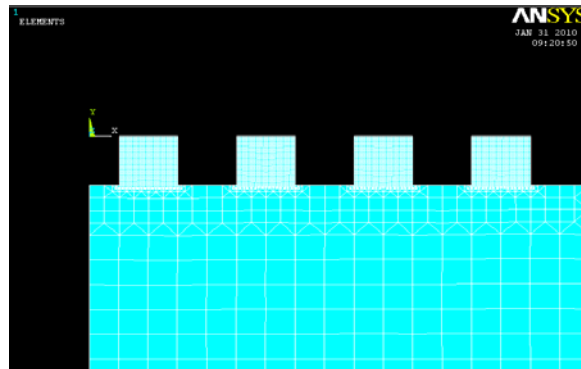


**Gambar 3. 23** Seleksi *area* yang akan *dimeshing*



**Gambar 3. 24** *Menu rerine mesh at element*

4. Dari *ANSYS Main menu* kemudian klik *Refine Mesh at Element* seperti pada Gambar 3.24 klik *Advanced Options Yes* lalu klik *OK* akan muncul *Menu Refine Mesh At Element Advanced Options*, ulangi beberapa kali untuk mendapatkan hasil *Messing* yang lembut.
5. Klik *OK*, maka akan terlihat hasil *meshing* seperti pada Gambar 3.25.

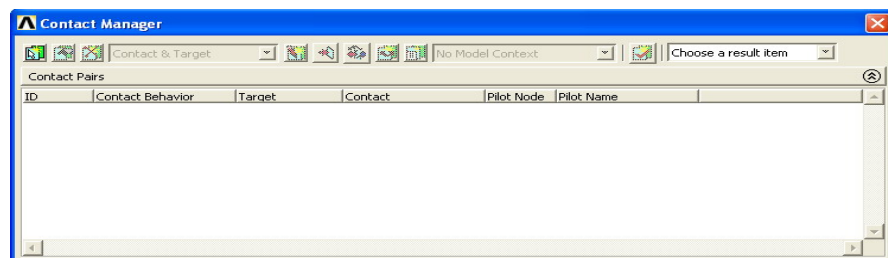


**Gambar 3. 25 Plot meshing area dengan refine mesh at element**

### 3. 4. 5 Penentuan Kontak dan Target Permukaan

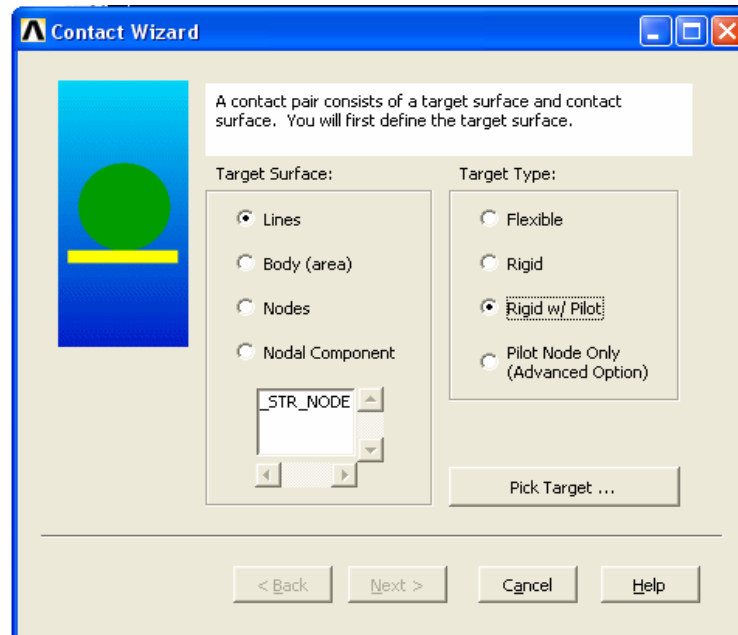
Kontak antara permukaan *hemispheres* ini menggunakan *CONTACT172* dan *TARGET169*. Berikut ini langkah penentuan kontak dan target permukaan:

1. Dari *ANSYS Main menu* pilih *Main menu > Preprocessor > Modeling > Create > Contact Pair*, maka akan muncul menu *Contact Manager* seperti pada Gambar 3.26.



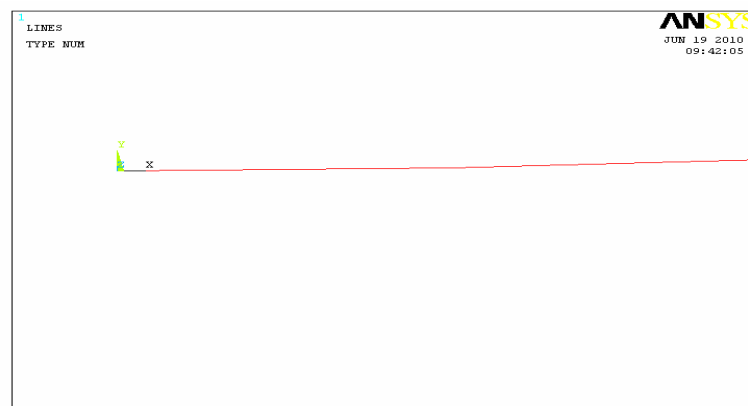
**Gambar 3. 26 Menu contact manager**

2. Dari Gambar 3.26, klik *button contact wizard* kemudian akan tampil menu *Contact Wizard* seperti pada Gambar 3.27 sebagai berikut;

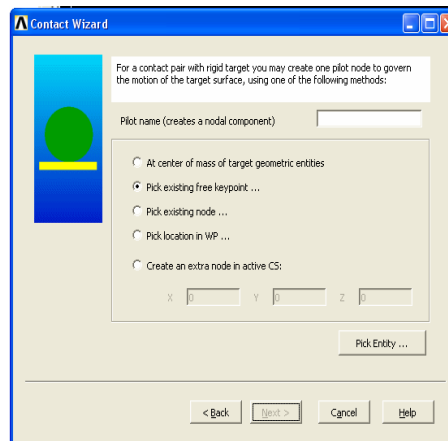


**Gambar 3. 27 Menu *contact wizard* untuk *target surface***

3. Dari Gambar 3.27 pada pilihan *Target Surface* memilih *Lines*, pada *Target Type* memilih *Rigid W/Pilot* dan selanjutnya *minimize* menu *Contact Wizard*.
4. Dari menu *Select Entities* pilih *Lines* dan *By Num/Pic*, memilih opsi *From Full* dan klik *OK*.
5. Memilih *Lines* sebagai target permukaan dalam hal ini busur pada *hemispheres* bagian Atas seperti pada Gambar 3.28. Kemudian panggil *Contact Wizard*, klik *Pick Existing Free Keypoint > Pick Entity >* pada Gambar 3.29.

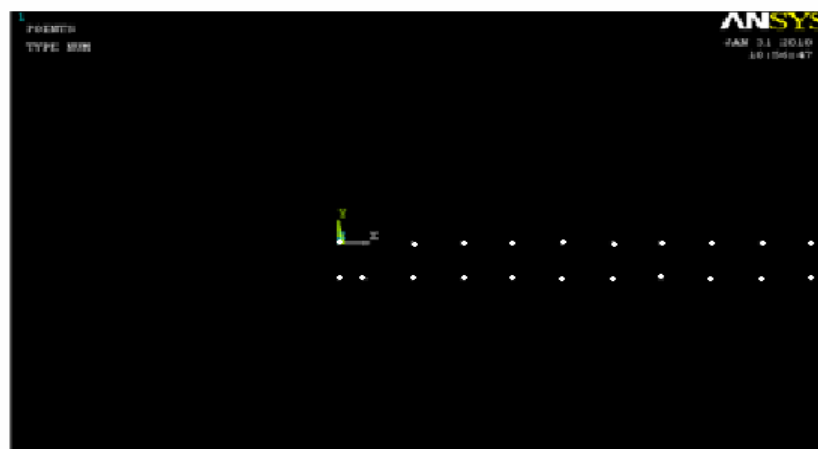


**Gambar 3. 28 Seleksi *lines* sebagai *target***



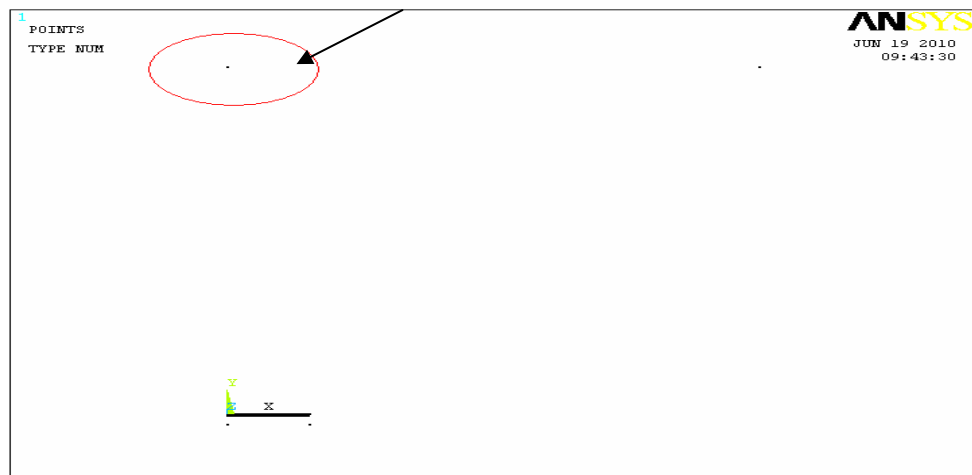
**Gambar 3. 29** Menu *contact wizard* untuk *pick existing free keypoint*

6. Selanjutnya Dari menu *Contact Wizard* pilih *Pick Entity*, maka akan muncul tampilan *Menu Sleect Keypoint For Pilo..* pada Gambar 3.30 dan kemudian klik *OK*.



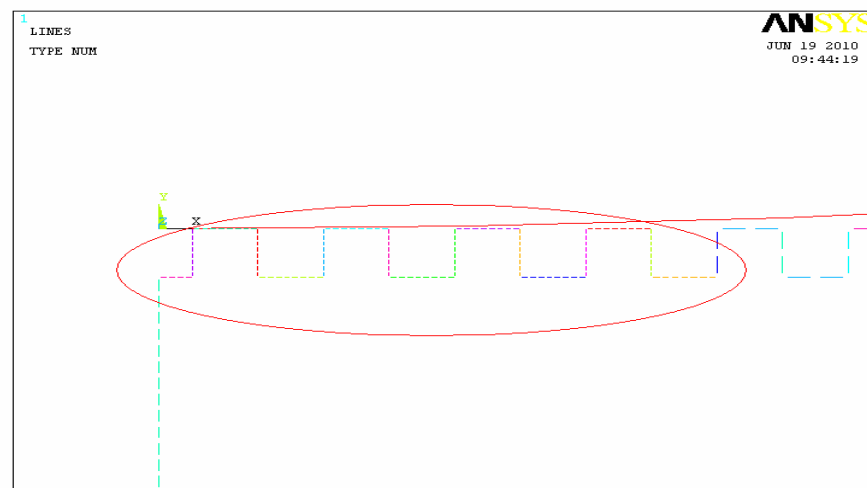
**Gambar 3. 30** Menu *select keypoint for pilo...*

7. Kemudian Dari *ANSYS Main Tool* yang berada pada sisi sebelah kanan klik *Fitview* untuk mengetahui *Center Keypoint* selanjutnya klik di *Center Keypoint* tersebut seperti pada Gambar 3.31.



**Gambar 3. 31 Plot seleksi keypoint sebagai center**

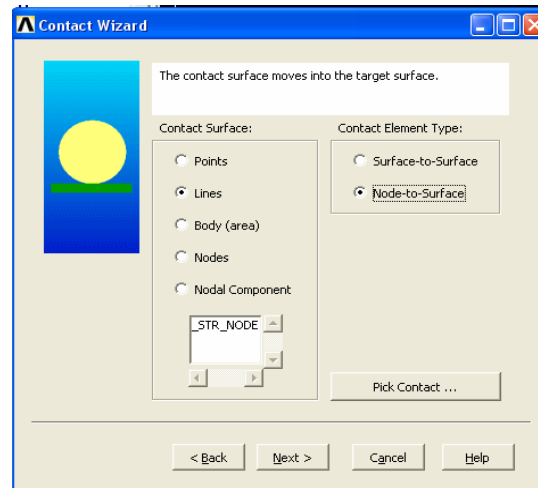
8. Untuk menghilangkan seleksi sebelumnya, dari *Utility menu* pilih *select everything*. Kemudian dari *Utility menu* pilih *Plot Line*.
9. Kemudian dari *Utility menu* pilih *Select Entities*, akan tampil menu *Select Entities*.
10. Dari menu *Select Entities* pilih *Lines* dan *By Num/Pic*, memilih opsi *From Full* dan klik *OK*.
11. Memilih *lines* sebagai kontak permukaan dalam hal ini *Asperity* pada bagian atas benda kerja seperti pada Gambar 3.32.



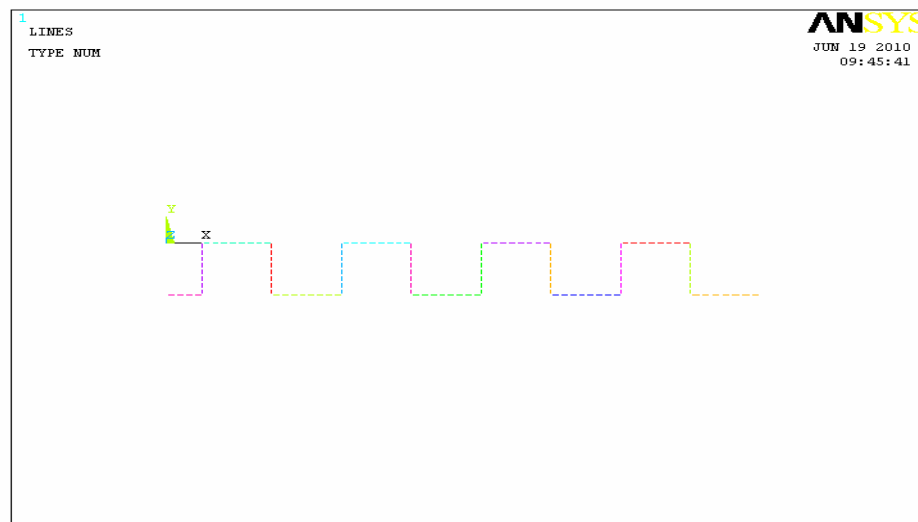
**Gambar 3. 32 Seleksi lines sebagai target**

12. Dari *Utility menu* pilih *select entities*, akan tampil menu *Select Entities*.

13. Dari menu *Select Entities* pilih *Nodes* dan *Attached to*, memilih opsi *Lines all*, memilih *Reselect* dan kemudian klik *OK*.
14. Kemudian kembali lagi pada menu *Contact Wizard* klik *Pick Contact*, memilih nodal yang terdapat sepanjang *Line* pada bagian atas dari *Asperity* seperti pada Gambar 3.33.



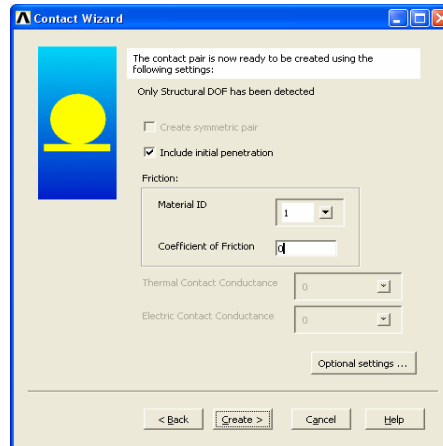
**Gambar 3. 33 Menu *contact wizard* untuk *pick existing free keypoint***



**Gambar 3. 34 Plot seleksi *nodal* pada *lines* sebagai *contact surface***

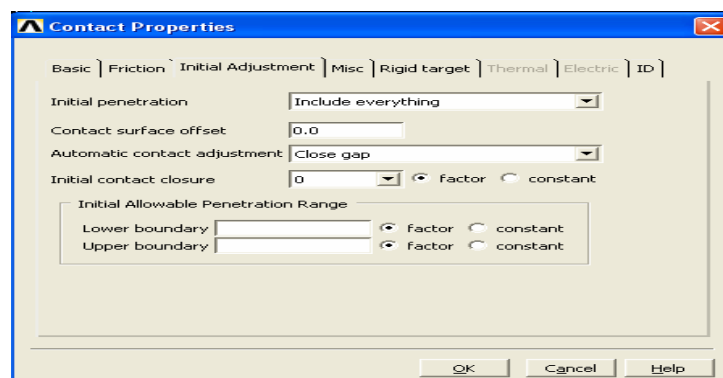
15. Kemudian menu *Contact Wizard* akan muncul kembali, selanjutnya klik *Next*.

16. Selanjutnya akan muncul kembali menu *contact wizard* seperti pada Gambar 3.35, pada *Coefficient of friction* masukkan nilai 0, karena pada kasus ini adalah kontak tanpa gesekan (*frictionless*). kemudian memilih *Optional Setting*.



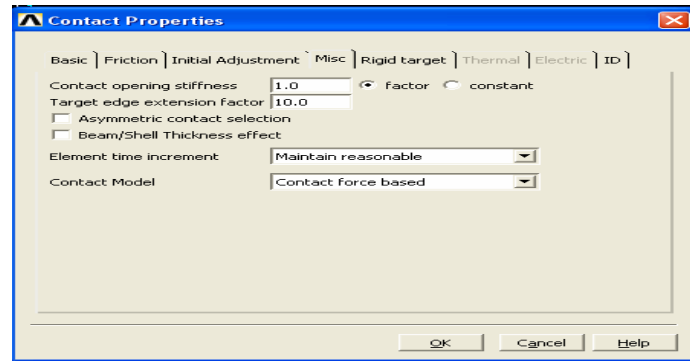
**Gambar 3. 35 Menu *contact wizard* untuk *coefficient of friction***

17. Kemudian menu *Contact Properties* akan muncul seperti pada Gambar 3.36, pilih *Initial Adjustmenst* pada *Automatic Contact Adjustment* pilih opsi *Close Gap* selanjutnya klik *OK*.



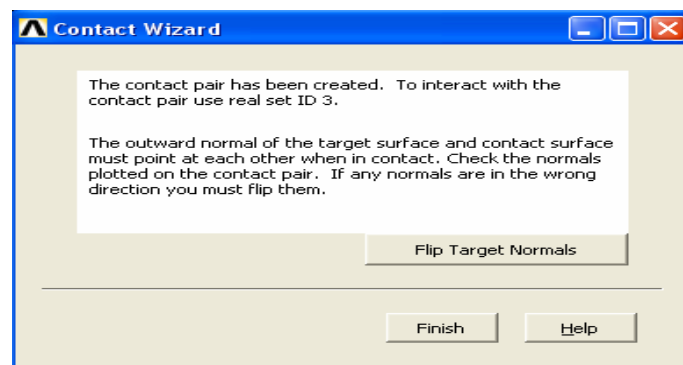
**Gambar 3. 36 Menu *contact properties***

18. Selanjutnya akan muncul kembali menu *contact Properties* seperti pada Gambar 3.37, pada *Element Time Increment* pada *Maintain Reasonable* Klik *OK*.



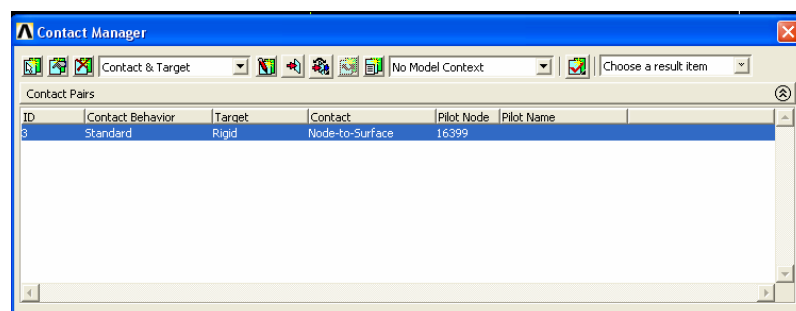
**Gambar 3. 37 Menu *contact properties*2**

19. Maka akan kembali lagi pada Gambar 3.35 sebelumnya, kemudian klik *Create*.
20. Menu *Contact Wizard* akan muncul kembali seperti pada Gambar 3.38.



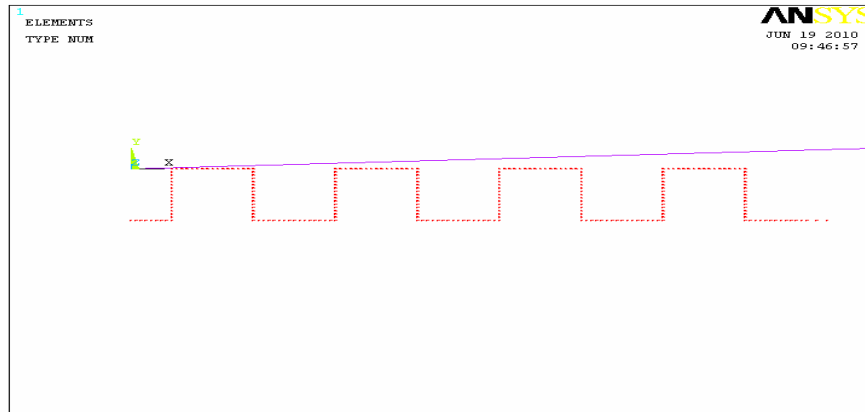
**Gambar 3. 38 Menu *contact wizard* untuk status kontak**

21. Dari Gambar 3.38, klik *finish*. Kemudian akan muncul menu *Contact Manager* seperti pada Gambar 3.39.



**Gambar 3. 39 Menu *contact manager* penentuan *contact* dan *target surface***

22. Menutup menu *Contact Manager* pada Gambar 3.39, kemudian akan terlihat plot *CONTACT172* dan *TARGET169* seperti pada Gambar 3.40.



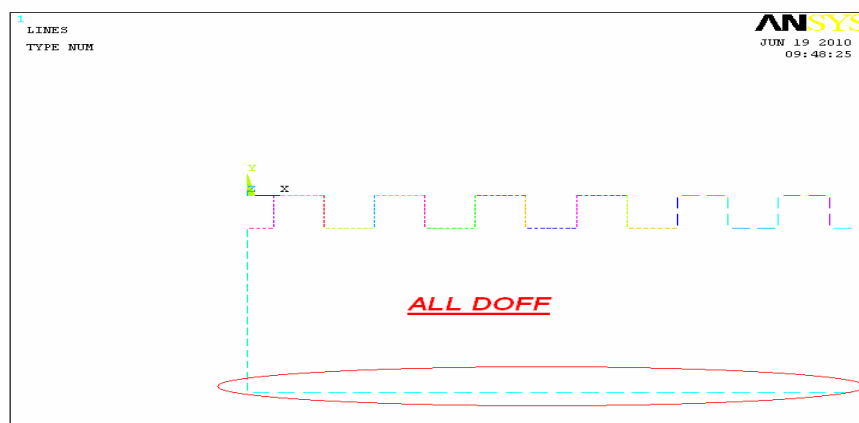
**Gambar 3. 40 Plot *contact172* dan *target169***

### 3.5 Solusi (*Solution*)

#### a Penentuan Kondisi Batas

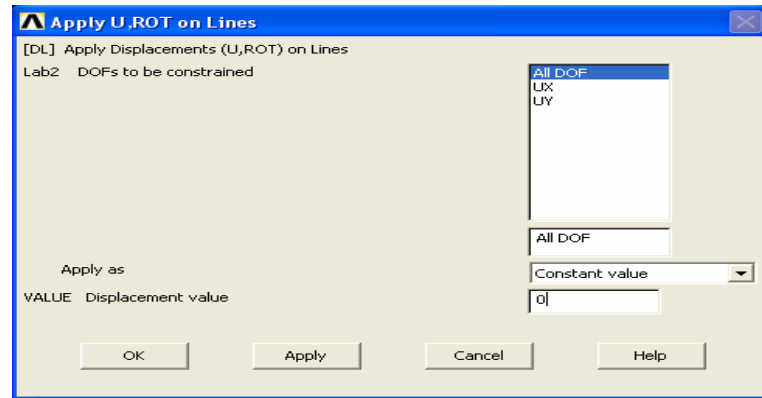
Selanjutnya menentukan kondisi batas pada permukaan bagian bawah dari *Speciment*, dimana saat *Speciment* dikenai beban maka nodal yang terdapat pada permukaan bagian bawah *Speciment* tidak dapat bergerak dalam arah *x* maupun bergerak dalam arah *y*. Berikut ini langkah pemodelannya:

1. Dari *ANSYS Main menu* pilih *Main menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Structural > Displacement > On Lines*.



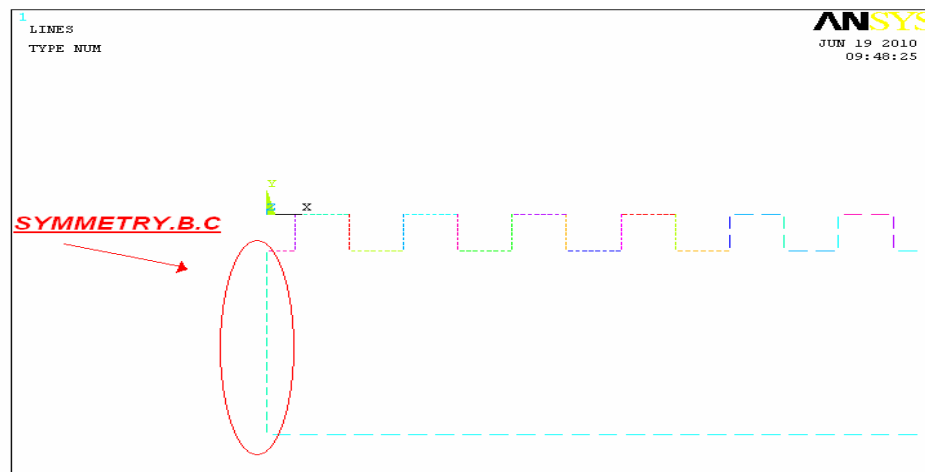
**Gambar 3. 41 Seleksi *lines* bagian bawah *speciment* untuk penentuan kondisi batas**

- Memilih *lines* bagian bawah dari *Asperity* seperti pada Gambar 3.41, kemudian klik *OK*. Maka menu *Apply U, Rots on Areas* akan muncul seperti terlihat pada Gambar 3.42.



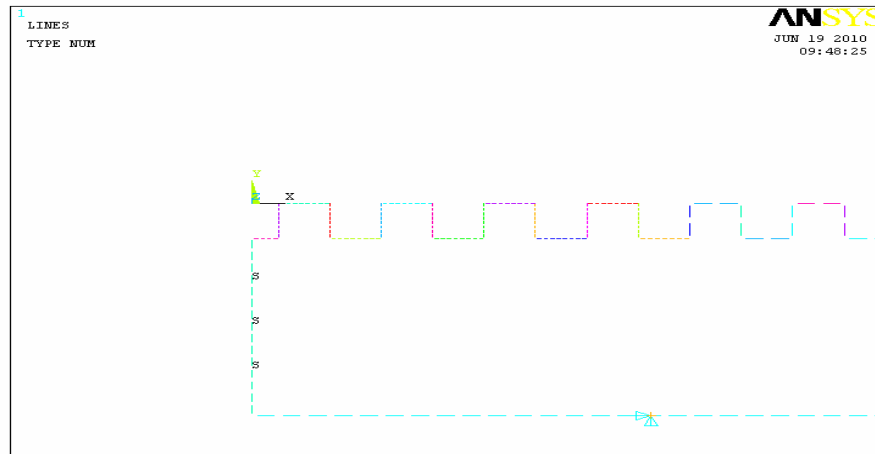
**Gambar 3. 42 Menu *apply U, ROT on lines***

- Dari Gambar 3.42 memilih pada *DOFs to be constrained* dan masukkan nilai 0 pada *displacement value*, kemudian klik *OK*.
- Dari *ANSYS Main menu* pilih *Main menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Structural > Displacement > Symmetry.B.C.*



**Gambar 3. 43 Seleksi *lines* pada sumbu simetri untuk kondisi batas**

5. Memilih *line* pada bagian sumbu simetri *Speciment* seperti pada Gambar 3.43, kemudian klik OK. Maka akan muncul seperti pada Gambar 3.44.

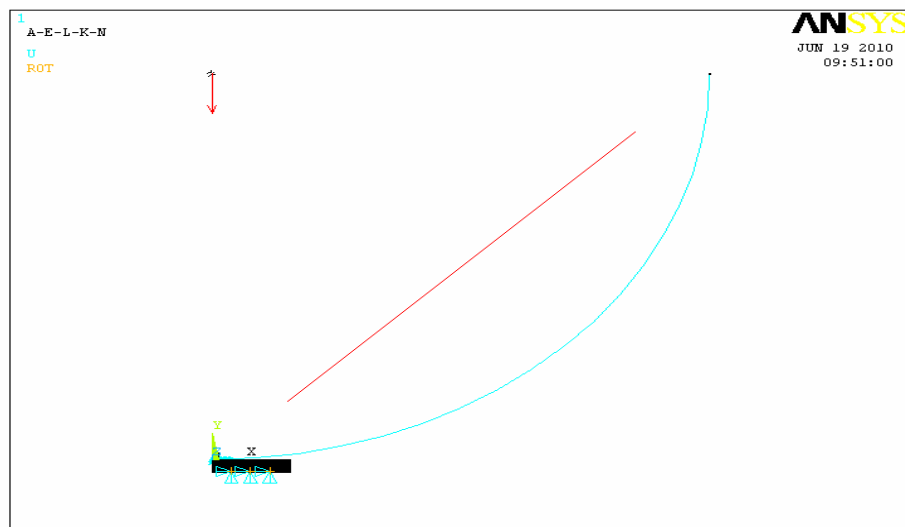


**Gambar 3. 44 Plot kondisi batas tumpuan**

#### b **Pembebanan**

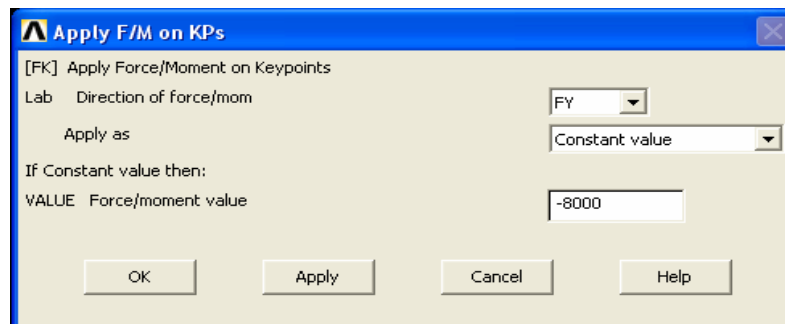
Berikut ini akan menerapkan gaya kontak pada kedua hemispheres. Berikut langkah pemodelan pembebanannya:

1. Dari *ANSYS Main menu* pilih *Main menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Structural > Force/Moment > On Keypoints*.
2. Dari *Utility menu* pilih *Plot > Multiplot >* , akan tampil seperti Gambar 3.45 dibawah ini.



**Gambar 3. 45 Seleksi keypoints**

3. Klik titik 1 seperti pada Gambar 3.45, kemudian klik *OK*. Maka menu *Apply F/M on KPs* akan muncul seperti pada Gambar 3.46.



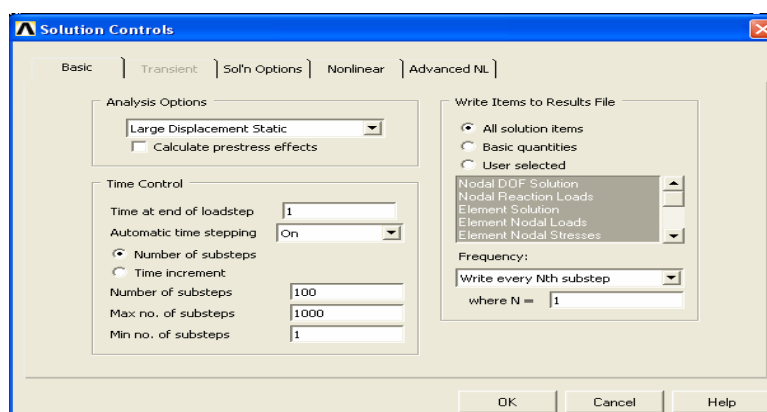
**Gambar 3. 46 Menu *apply F/M on KPs***

4. Dari Gambar 3.46 memilih *FY* untuk *Direction of force/mom* dan memasukkan nilai gaya kontak *-8000 N* untuk *Force/moment value*, kemudian klik *OK*.

### c Pemecahan Masalah (*Solving*)

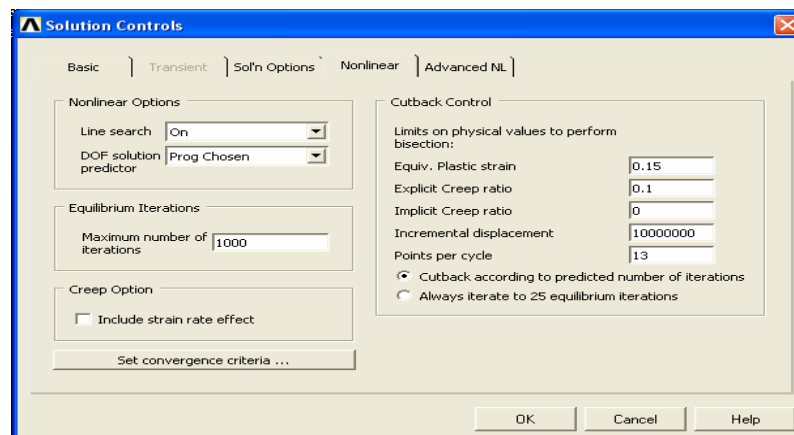
Berikut ini langkah-langkah pemecahan masalah dari pemodelan yang dilakukan sebelumnya:

1. Dari *ANSYS Main menu* pilih *Main menu > Solution > analysis type > Sol'n Control*. Maka menu *Solution Controls* akan muncul seperti pada Gambar 3.47.



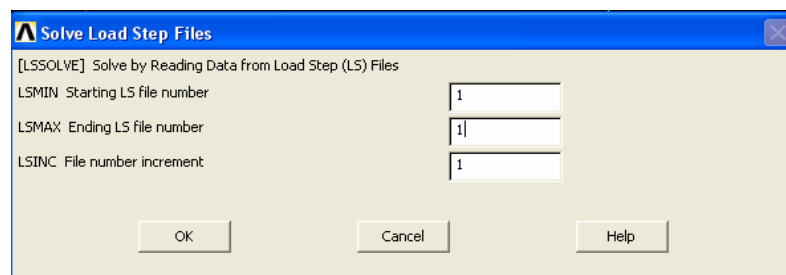
**Gambar 3. 47 Menu *solution controls***

2. Dari *tab Basic* dari Gambar 3.47, memilih *Large Displacement Static* pada *Analysis Options* dan memasukkan nilai 1 untuk *Time at end of loadstep* dan memilih *On* pada *Automatic time stepping*, selanjutnya memasukan nilai 100 pada *Number Of Substeps* dan 1000 untuk *Max no. of.Substep*,serta 1 untuk *Min no. of.Substep*.
3. Dari *tab Basic* dari Gambar 3.47, memilih *Line Search On* pada *Non Linear* dan *Max of iterations* dengan nilai 1000 Selanjutnya klik *OK* seperti Gambar 3.48 di bawah ini.



**Gambar 3. 48 Menu *solution controls*2**

4. Langkah berikutnya dari *ANSYS Main menu* memilih *Main menu > Solution > Solve > Current LS* seperti pada gambar 3.49 , kemudian klik *OK*. Proses *running* program akan memakan waktu beberapa menit.



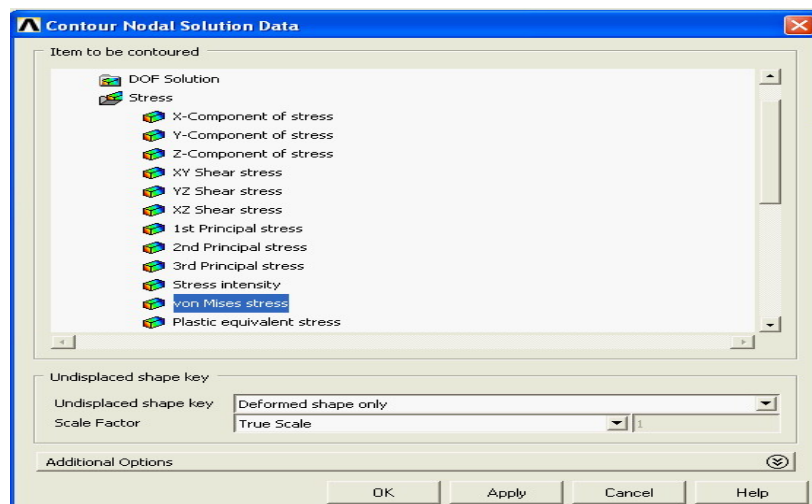
**Gambar 3. 49 Menu *solve load step file***

### 3.6 Proses *Post-Processing*

#### a. Plot Distribusi Tegangan *Von Misses*

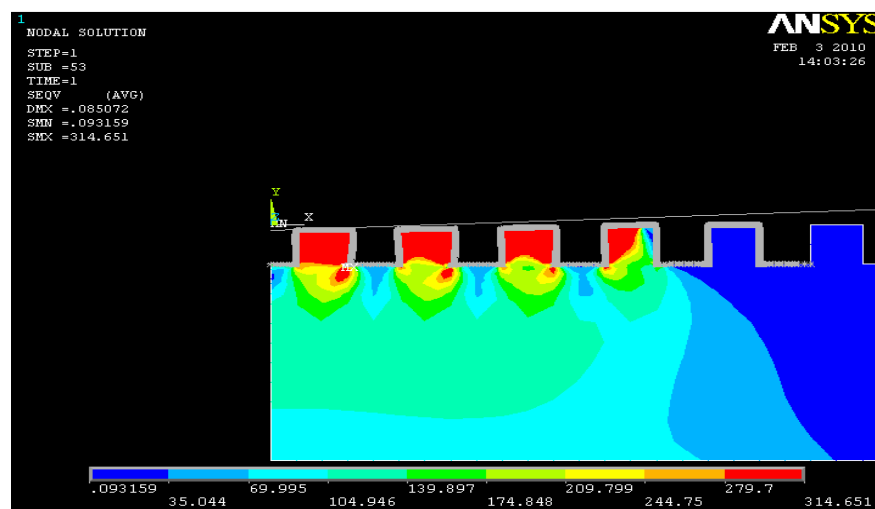
Untuk melihat hasil plot distribusi tegangan *von Misses* untuk pemodelan dari *ANSYS 9.0* dapat dilakukan dengan:

1. Dari *ANSYS Main menu* pilih *Main menu > Plot results > Contour plot > Nodal solu*, kemudian akan muncul menu *Contour Nodal Solution Data* seperti pada Gambar 3.50.



Gambar 3. 50 Menu *contour nodal solution data*

2. Dari Gambar 3.50, memilih *Stress > von Misses stress*, kemudian klik *OK*. Maka akan terlihat distribusi tegangan *von Misses* seperti pada Gambar 3.51.

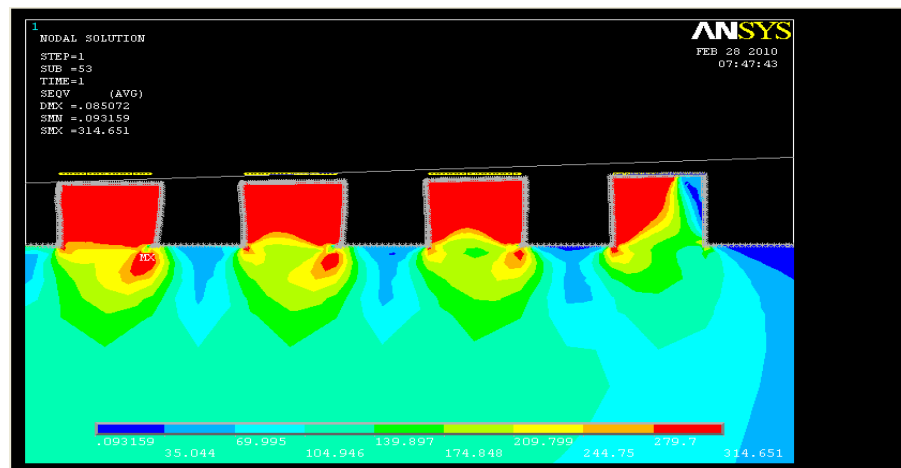


Gambar 3. 51 Distribusi tegangan *von misses* pada gaya kontak 8000 N

### b. Plot Hasil Deformasi.

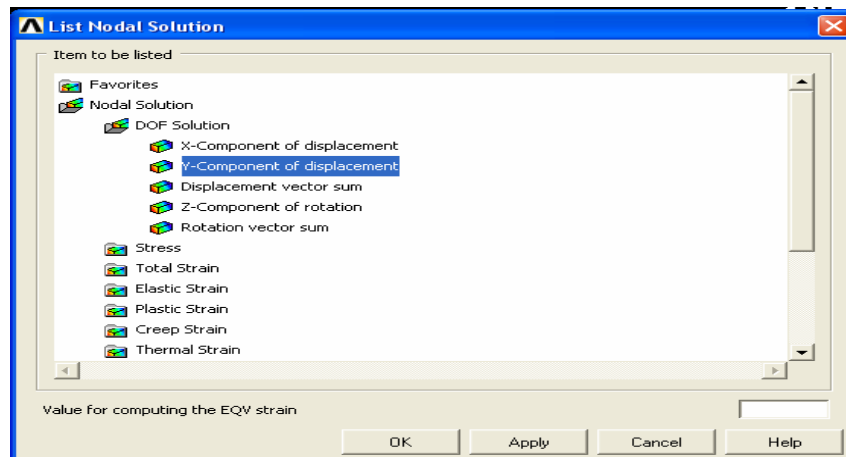
Berikut ini langkah-langkah melakukan plot hasil deformasi:

1. Dari ANSYS Utility menu pilih Select Entities, akan tampil menu Select Entities.
2. Dari menu *Select Entities* pilih *Lines* dan *By Num/Pic*, memilih opsi *From Full* dan klik *OK*.
3. Memilih *lines* sebagai kontak permukaan dalam hal ini *Asperity* pada bagian atas benda kerja seperti pada Gambar 3.52.
4. Dari *Utility menu* pilih select entities, akan tampil menu *Select Entities*.
5. Dari menu *Select Entities* pilih *Nodes* dan *Attached to*, memilih opsi *Lines all*, memilih *Reselect* dan kemudian klik *OK*.



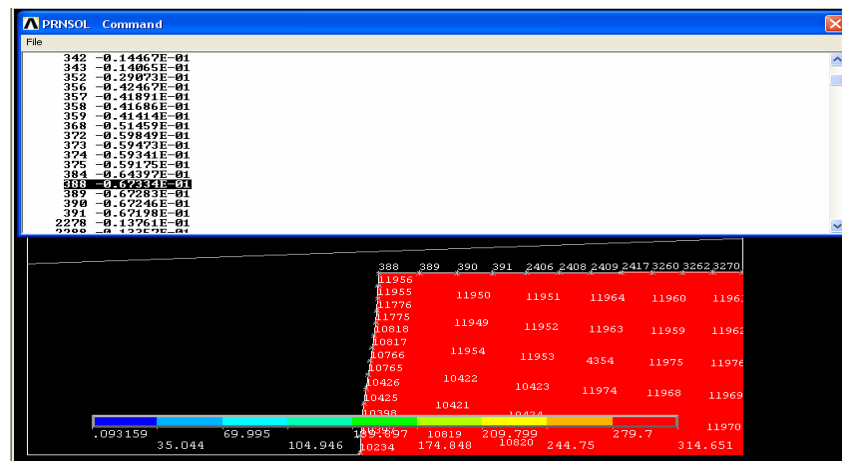
**Gambar 3. 52 Seleksi *line contact*.**

6. Untuk menampilkan angka dari tiap element benda, dari *Utility menu* pilih *Plots Ctrl > Numbering* akan muncul menu *Plot Numbering Control*, kemudian klik *NODE numbering On*.
7. Untuk mencari besarnya Displacement searah sumbu Y dari ANSYS Main menu pilih Main menu > Plot results > Nodal solution > Y – Component of Displacement, kemudian akan muncul menu Menu List Nodal Solution seperti pada Gambar 3.53 dibawah ini.



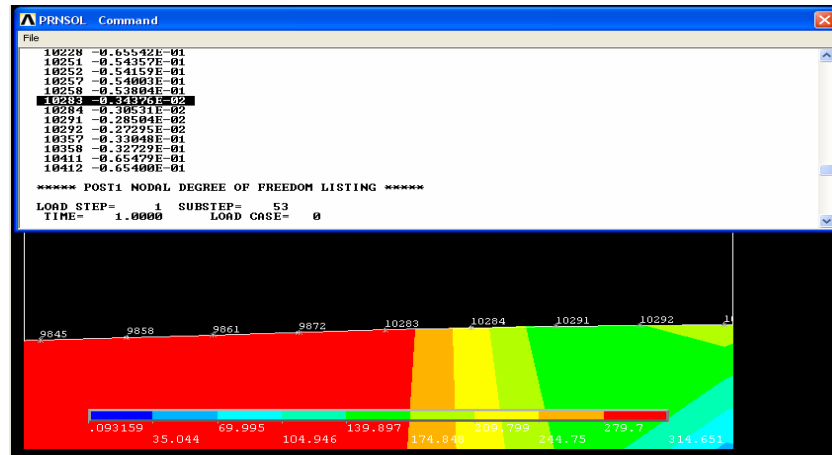
**Gambar 3. 53 Menu list nodal solution.**

8. Dari Menu *List Nodal Solution* akan muncul angka – angka *Displacement* dari tiap *Nodal*.dimulai dari Nodal awal kontak seperti pada Gambar 3.54 di bawah ini.



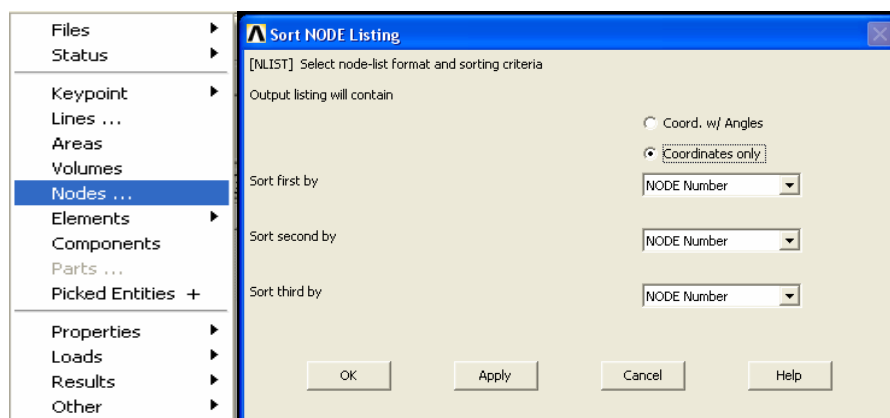
**Gambar 3. 54 Menu PRNSOL command 1**

9. Selanjutnya dari Nodal awal kontak seperti pada Gambar 3.54 diatas,Kemudian dilanjutkan sampai Nodal akhir kontak seperti pada Gambar 3.55. di bawah ini



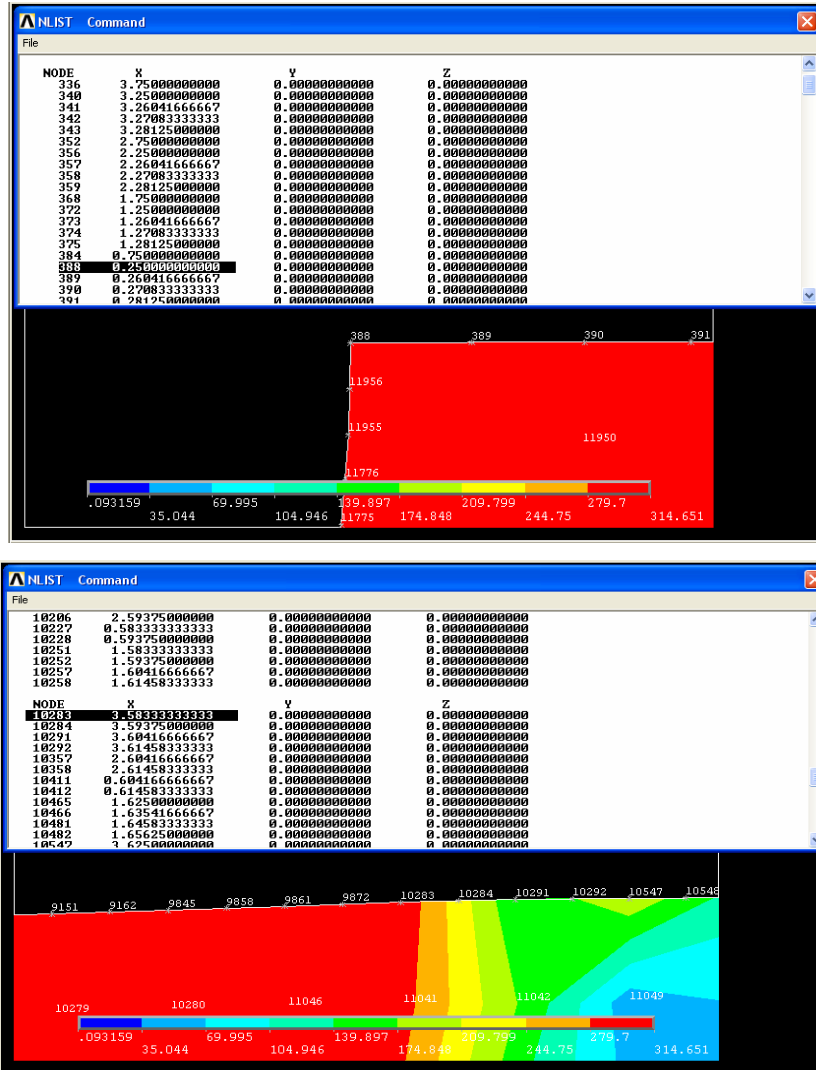
**Gambar 3. 55 Menu PRNSOL command 2**

10. Dari ANSYS Utility menu pilih List > Nodes > akan muncul tampilan Menu Sort NODE Listing pada Gambar 3.56 dibawah ini, kemudian pilih Coordinates Only pada output listing will contain, lalu Klik OK



**Gambar 3. 56 Menu sort NODE listing**

11. Selanjutnya dari Menu Sort NODE Listing akan muncul Nilai X dari tiap Nodal dimulai dari Nodal saat awal kontak sampai akhir kontak seperti Gambar 3.57 di bawah ini.



Gambar 3. 57 Menu NLIST command

## BAB 4 EKSPERIMEN

### 4.1 Spesimen

Spesimen dibuat dari bahan *brass* dengan bentuk lempengan bulat, *modulus elasisitas* ( $E$ ) = 97 GPa, *Poisson's ratio* ( $\nu$ ) = 0.34, *yield strength* ( $Y$ ) = 0,341 MPa. dengan ketebalan ( $T$ ) spesimen adalah 1,5 mm, 3 mm, 6 mm, 9 mm, dan 12 mm seperti terlihat pada Gambar 4.1 di bawah. Harga kekerasan *brass* berdasar hasil pengujian adalah 73 HRB. Salah satu sisi dari permukaan spesimen yang akan dibuat bidang kontak dibentuk alur melingkar dengan lebar 0,5 mm, kedalaman 0,5 mm, dan lebar puncak 0,5 mm. Pada permukaan tersebut nantinya akan terjadi kontak dengan *sphere* dari bahan baja yang mempunyai harga kekerasan 61 HRC.



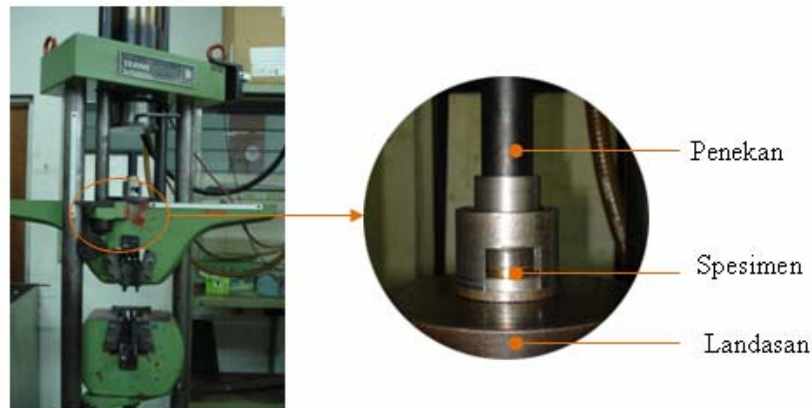
**Gambar 4. 1 Spesimen**

### 4.2 Prosedur Eksperimen

Eksperimen dilakukan pada mesin uji tekan seperti terlihat pada Gambar 4.2. Pembebanan berupa *interference* ( $\omega$ ) pada *sphere* (*indenter*) bagian atas sedangkan *rough surface* (spesimen) bagian bawah di *fixed*. Kedua benda masing-masing dipasang pada dudukannya dengan posisi saling berhadapan sehingga terjadi kontak di permukaan. Peralatan tersebut diletakkan diantara rahang tetap dengan rahang gerak, sehingga ketika rahang gerak diberi beban maka kedua benda akan saling menekan.

Beban yang diberikan sebesar 8000 N, 11000 N, dan 20000 N berdasarkan skala pada *dynamometer* dan ditekan selama 1 menit dengan menggunakan *stopwatch*. Setelah beban dihilangkan kemudian spesimen diukur dengan mikrometer untuk mengetahui besarnya deformasi yang terjadi. Penentuan besar beban awal menggunakan pemodelan pada FEM untuk melihat timbulnya

deformasi plastis yang terjadi, kemudian divalidasi dengan hasil eksperimen. Eksperimen dengan menggunakan perbedaan beban dilakukan agar diperoleh hasil mengenai pengaruh besarnya beban yang diberikan terhadap deformasi plastis pada masing-masing spesimen.



**Gambar 4. 2 Mesin uji tekan**

### 4.3 Peralatan Pendukung

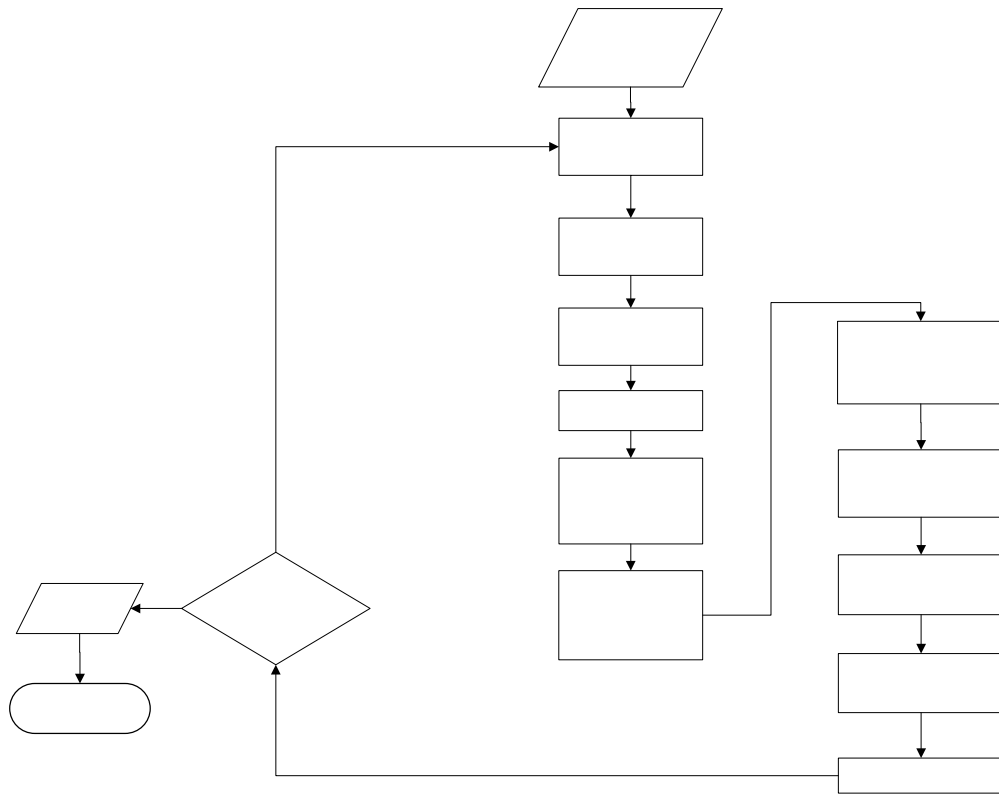
Peralatan pendukung berfungsi sebagai alat bantu untuk menempatkan spesimen sekaligus meneruskan beban yang terjadi pada mesin uji tekan. Penekan yang terbuat dari bahan baja yang dikeraskan dengan salah satu ujungnya dibentuk radius 100 mm dipasang pada pengarah dan *housing* dengan suaian *sliding* sehingga menjamin keduanya sesumbu. Gambar 4.3 menunjukkan komponen peralatan pendukung. Pada saat beban berlangsung maka ujung penekan bagian bawah yang berbentuk *sphere* akan menekan permukaan spesimen sesuai dengan beban yang ditentukan sehingga terjadi deformasi.



**Gambar 4. 3 Komponen peralatan pendukung**

#### 4.4 Detail Eksperimen

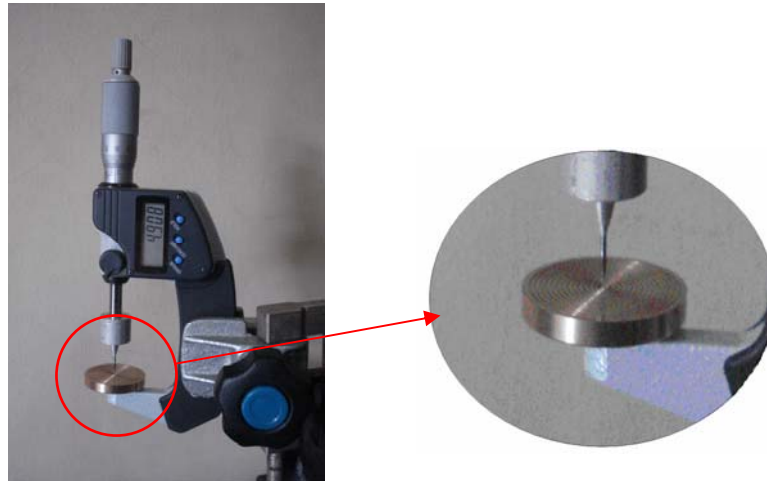
Langkah pelaksanaan eksperimen dipaparkan menggunakan diagram alir seperti dilihat di Gambar 4.4.



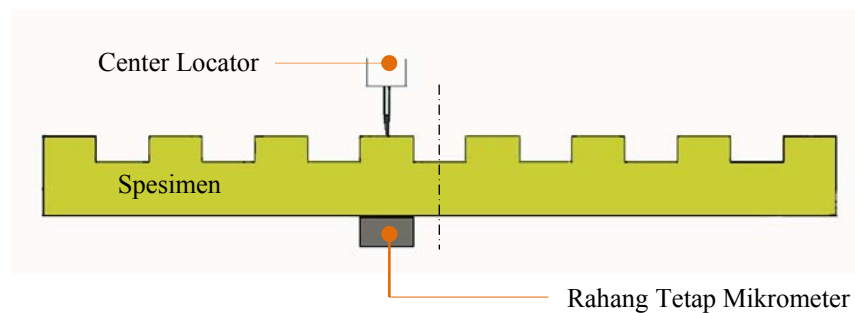
**Gambar 4. 4 Diagram alir eksperimen**

Sebelum melakukan eksperimen semua spesimen dibersihkan menggunakan alkohol, kemudian dikeringkan di udara bebas. Spesimen diukur arah axial menggunakan mikrometer, agar titik pengukuran tepat pada sumbu spesimen maka digunakan alat bantu penepat titik sumbu (*center locator*) seperti pada Gambar 4.5.

Ya  
Selisih pengukuran  
 $5 \mu\text{m}$  ?  
Tidak  
 $\omega_p$



**Gambar 4. 5 Mikrometer dan *center locator***



**Gambar 4. 6 Gambar skema pengukuran spesimen**

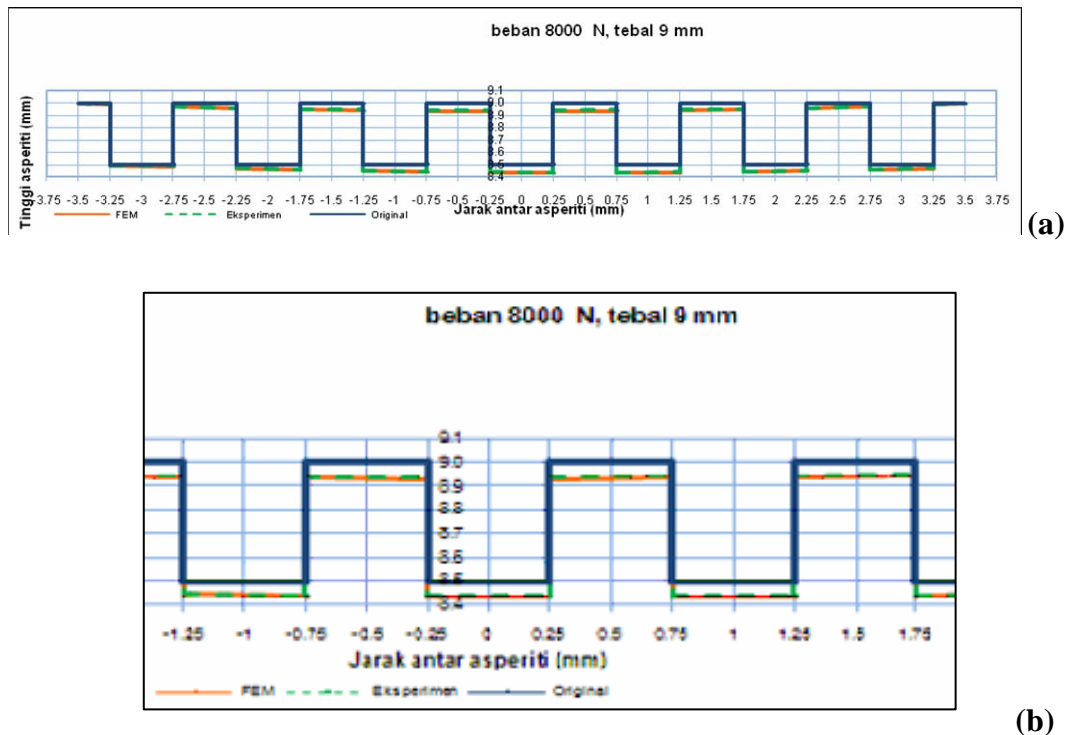
Eksperimen dilakukan menggunakan 3 variabel beban, kelompok pertama menggunakan beban 8000 N, kelompok kedua 11000 N, dan kelompok ketiga 20000 N. Untuk masing-masing kelompok beban, spesimen yang diuji sebanyak 5 buah dengan ketebalan yang bervariasi. Eksperimen dilakukan dengan cara menekan spesimen pada mesin uji tekan. Untuk melakukan eksperimen spesimen diberi pelumas terlebih dahulu setelah dipasang pada dudukannya, kemudian baru dipasang pada mesin uji tekan untuk dilakukan pengujian. Pembebanan tiap spesimen dilakukan dengan menahan masing-masing beban selama 1 menit, kemudian beban diadakan. Setelah spesimen dilepas dari dudukannya kemudian diukur lagi arah axial, selisih ketebalan spesimen sebelum dengan setelah diuji merupakan besarnya deformasi yang terjadi pada masing-masing spesimen.

Pengukuran spesimen setelah pengujian dilakukan dengan cara meletakkan spesimen pada rahang tetap mikrometer dengan permukaan rata di bagian bawah, sedangkan permukaan hasil deformasi yang akan diukur menghadap pada *center locator* yang terpasang pada rahang gerak micrometer seperti terlihat pada Gambar 4.6. Pengukuran awal dilakukan pada bidang alur yang paling dekat dengan sumbu, selanjutnya dilanjutkan pada bidang-bidang alur yang lain secara berturut-turut. Hasil pengukuran kemudian ditabelkan dan dikelompokkan berdasarkan besar beban. Untuk masing-masing kelompok beban variabelnya adalah ketebalan spesimen.

## BAB 5 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 5.1 Hasil Simulasi dan Eksperimen pada *Real Surface*

Pada saat pembebanan berlangsung, maka deformasi yang terjadi pada permukaan spesimen seperti ditunjukkan pada Gambar 5.1. Hal tersebut menggambarkan kondisi *real surface* yang terjadi pada spesimen  $T = 9$  mm beban 8000 mm. Pada gambar juga menunjukkan bahwa deformasi plastis terbesar terjadi pada alur yang mendekati sumbu. Semakin besar radius bidang kontak yang terjadi maka deformasi plastis akan semakin membesar. Dari hasil simulasi maupun eksperimen terlihat bahwa kurva yang terbentuk tidak jauh menyimpang, artinya hasil dari eksperimen dapat divalidasi terhadap hasil dari simulasi. Sedangkan bentuk deformasi *real surface* untuk beban dan ketebalan yang lain dimuat pada halaman lampiran.

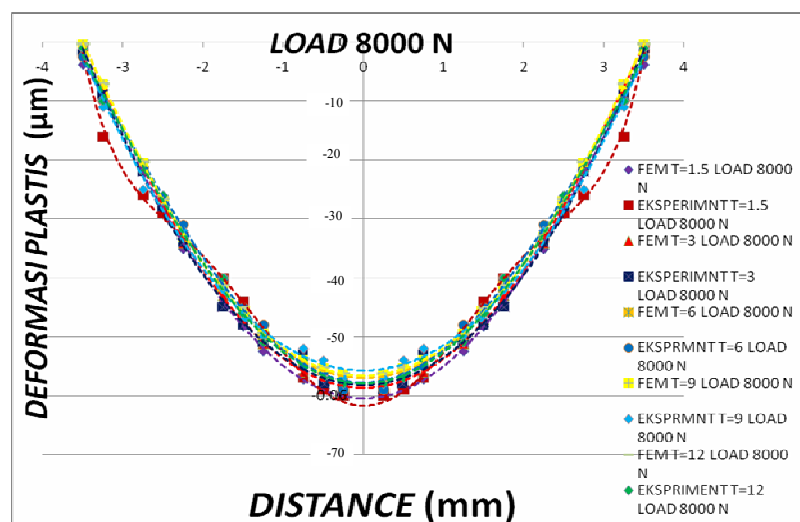


Gambar 5. 1 (a) Plot deformasi pada *real surface* (b) Pembesaran (*zoomed*)

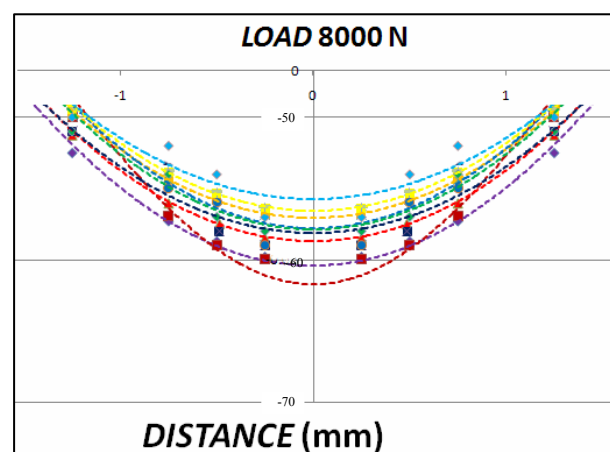
## 5.2 Hasil Perbandingan Deformasi pada Simulasi dan Eksperimen

### 5.2.1 Deformasi pada Simulasi dan Eksperimen untuk Beban 8000 N

Gambar 5.2 di bawah merupakan grafik rangkuman deformasi plastis pada simulasi dan eksperimen untuk beban 8000 N dengan ketebalan spesimen masing-masing 1,5 mm, 3 mm, 6 mm, 9 mm, dan 12 mm. Deformasi plastis terbesar terjadi pada spesimen dengan ketebalan 1,5 mm. Sedangkan deformasi plastis paling kecil terjadi pada spesimen dengan ketebalan 12 mm. Deformasi plastis hasil simulasi maupun eksperimen juga menunjukkan kecenderungan saling berimpit. Selain itu deformasi yang terjadi akan semakin membesar apabila *plate* yang ditekan makin menipis.



(a)

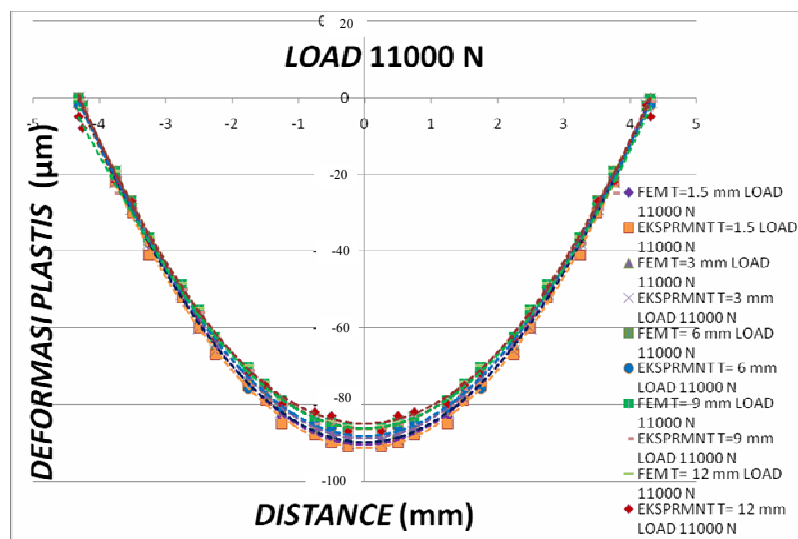


(b)

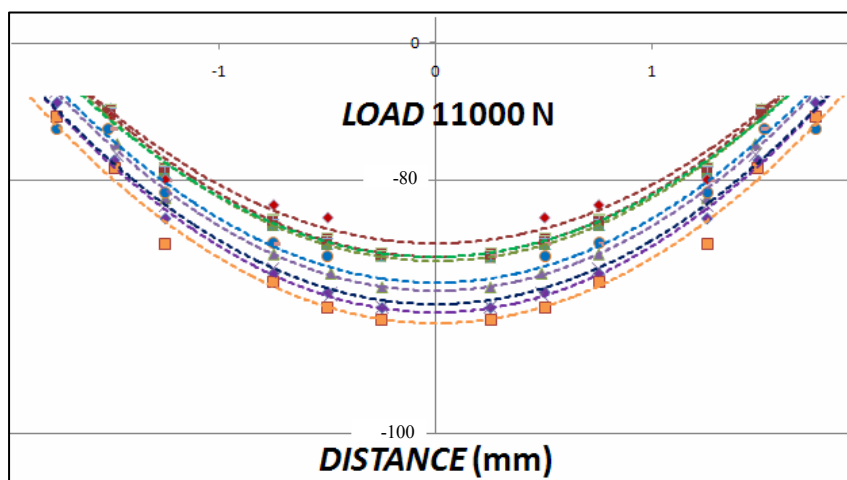
Gambar 5. 2 (a) Plot deformasi plastis terhadap jarak/posisi untuk beban 8000 N (b) Pembesaran (*zoomed*)

### 5. 2. 2 Deformasi pada Simulasi dan Eksperimen untuk Beban 11000 N

Gambar 5.3 di bawah merupakan grafik rangkuman deformasi plastis pada simulasi dan eksperimen untuk beban 11000 N dengan ketebalan spesimen masing-masing 1,5 mm, 3 mm, 6 mm, 9 mm, dan 12 mm. Deformasi plastis terbesar terjadi pada spesimen dengan ketebalan 1,5 mm. Sedangkan deformasi plastis paling kecil terjadi pada spesimen dengan ketebalan 12 mm. Deformasi plastis hasil simulasi maupun eksperimen juga menunjukkan kecenderungan saling berimpit. Selain itu deformasi yang terjadi akan semakin membesar apabila *plate* yang ditekan makin menipis.



(a)

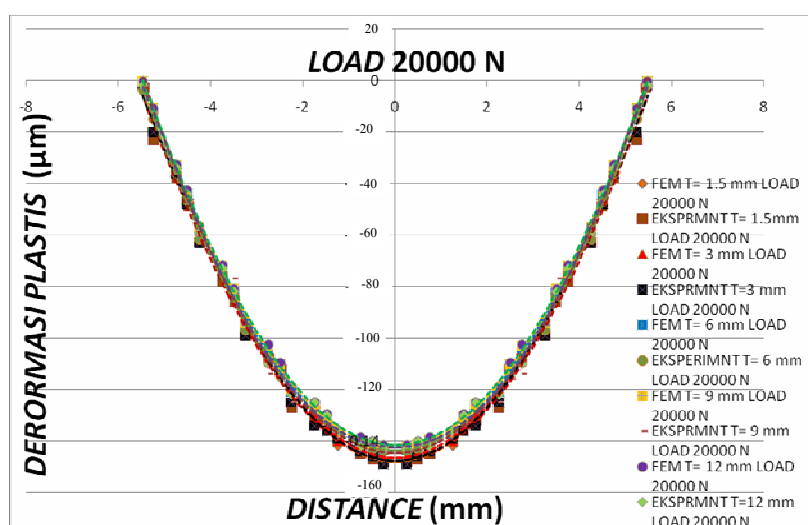


(b)

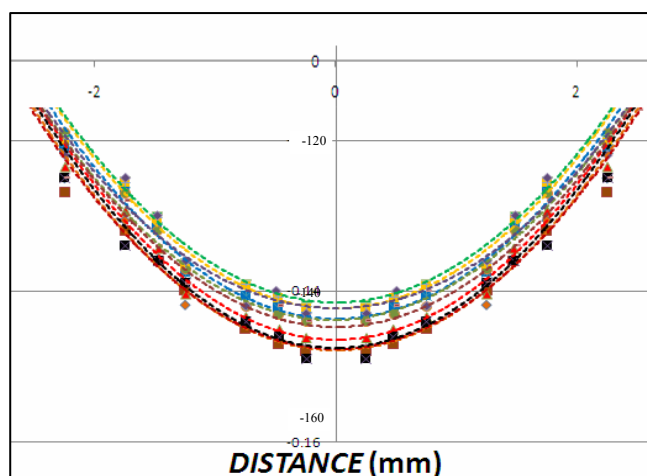
Gambar 5. 3 (a) Plot deformasi plastis terhadap jarak/posisi untuk beban 11000 N (b) Pembesaran (*zoomed*)

### 5. 2. 3 Deformasi pada Simulasi dan Eksperimen untuk Beban 20000 N

Gambar 5.4 di bawah merupakan grafik rangkuman deformasi plastis pada simulasi dan eksperimen untuk beban 20000 N dengan ketebalan spesimen masing-masing 1,5 mm, 3 mm, 6 mm, 9 mm, dan 12 mm. Deformasi plastis terbesar terjadi pada spesimen dengan ketebalan 1,5 mm. Sedangkan deformasi plastis paling kecil terjadi pada spesimen dengan ketebalan 12 mm. Deformasi plastis hasil simulasi maupun eksperimen juga menunjukkan kecenderungan saling berimpit. Selain itu deformasi yang terjadi akan semakin membesar apabila *plate* yang ditekan makin menipis.



(a)



(b)

Gambar 5. 4 (a) Plot deformasi plastis terhadap jarak/posisi untuk beban 20000 N (b) Pembesaran (*zoomed*)

## BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN

### 6.1 Kesimpulan

1. Dari hasil analisis deformasi plastis disekitar zona kontak, pada variabel beban terhadap spesimen menunjukkan bahwa deformasi surface yang terbentuk pada permukaan asperiti menunjukkan bentuk geometri yang tidak berubah. Semakin besar beban yang diberikan maka area deformasi surface yang terbentuk akan semakin besar pula.
2. Pada beberapa kali eksperimen dengan menggunakan ketebalan spesimen yang berbeda, deformasi yang terjadi akan semakin membesar apabila *plate* yang ditekan semakin tipis. Sebagai contoh pada beban 20000 N, deformasi yang terjadi pada spesimen dengan ketebalan ( $T$ ) = 1,5 mm sebesar 149  $\mu\text{m}$ , sedangkan pada beban yang sama dengan ketebalan ( $T$ ) = 12 mm sebesar 141  $\mu\text{m}$ , sebagaimana terlihat pada Gambar 5.4.

### 6.2 Saran

1. Perlu studi lebih lanjut untuk mempelajari material *fully plastic* sebagai input material pada FEM hal ini diperlukan karena selama ini dalam pemodelan FEM *Ansys 9.0* masih terkendala masalah *meshing* untuk itu diperlukan cara *meshing* yang baik agar memperoleh hasil Plot *Von Misses Stress* yang baik.
2. Perlunya dilakukan pengujian dengan berbagai macam material untuk mengetahui nilai tegangan dan regangan yang terjadi, karena tiap jenis material cenderung masih mengandung unsur campuran dengan logam didalamnya hal ini yang mempengaruhi nilai tegangan dan regangan yang terjadi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdo, J. and Farhang, K., 2005, "Elastic-plastic contact model for rough surfaces based on plastic asperity concept", *Int. J. Nonlinear Mech.* **40**, pp 495-506
- Archard, J.F., 1957, "Elastic deformation of law of friction", *Proc. Royal Soc.Lond.* **243A**, pp 190-205
- Astakhov. V.P., 2007, Editorial: tribology at the forefront of study and research on metal cutting, *Inst. J. Machining and Machinability of Material* **2**, pp.309-315
- Azushima, A., Kuba, S., Tani, S. and Olsson, D.D., 2006, "Direct observation of asperity deformation of specimens with random surfaces in upsetting and indentation processes", *Wear* **260**, pp 158-264
- Bhowmik, K, 2007, "*Experimental and finite element study of elastic-plastic indentation of rough surface*", *Departement of Mechanical Engineering, Indian Institute of science, Bangalore 560 012, India.*
- Bhushan, B.,1999a, Handbook of Micro/Nanotribology, *CRC Press LLC*, New York
- Bush, A.W., Gibson, R.D. and Thomas, T.R., 1975, "The elastic contact of a rough surface", *Wear* **35**, pp 87-111
- Cooper, M. G., Mikic, B. B., and Yovanovich, M. M., 1969, "Thermal Contact Conductance," *Int. J. Heat Mass Transfer* **12**, pp 279–300
- Chang, W.R., Etsion, I., dan Bogoy, D.B., 1987, "An Elastic-Plastic Model for the Contact of Rough Surfaces", *ASME Journal of Tribology* **109**, pp 257-263

Evseev, D.G., Medvedev, B.M. and Grigoriyan, G.G., 1991, "Modification of the elastic-plastic model for contact of rough surface", *Wear* **150**, pp 79-88

Francis, H.A., "Application of spherical indentation mechanics to reversible irreversible contact between rough surfaces", *Wear* **45**, pp 221-269 61

Greenwood, J.A., 1967, "The area of contact between rough surfaces and flats", *J.Lub. Tech.* **89**, pp 81-91

Greenwood, J. A., dan Williamson, J. B. P., 1966, "Contact of Nominally Flat Surfaces", *Proc. R. Soc. London* **295**, pp 300-319

Greenwood, J.A. and Rowe, G.W., 1965, "Deformation of surface asperities during bulk plastic flow", *J. Appl. Phys.* **36**, pp 667-668

Greenwood, J.A. and Tripp, J.H., 1971, "The contact of two nominally flat rough surfaces", *Proc. Inst. Mech. Eng.* **185**, pp 625-633

Halling, J. and Nuri, K.A., 1975, "The mechanics of the contact between deformable bodies", *Delft Univ. Press.*, pp 330-341, the Netherlands

Hertz, H., 1882, "Über die berührung fester elastische körper and uber die harte", *Verhandlungen des Vereins zur Beforderung des Gewerbefleisses, Leipzig*, Germany

Hisakado, T., 1974, "Effect of surface roughness on contact between solid surfaces", *Wear* **28**, pp 217-234

Ike Hiroshi, 2003, "Surface Deformation vs. bulk plastic deformation a key for microscopic control of surfaces in metal forming." *Hirosawa, Wako, Saitama* 351-0198, Japan.

- Johnson, K. L., 1985, “*Contact Mechanics*”, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kucharski, S., Klimczak, T., Polijaniuk, A. and Kaczmarek, J., 1994, “Finite-element model for the contact of rough surface”, *Wear* **177**, pp 1-13
- Majumdar, A. and Bhushan B., 1991, “Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces”, *J. Tribol.* **113**, pp 1-11
- McCool, J.I., 1986, “Comparison of models for the contact of rough surfaces”, *Wear* **107**, pp 37-60
- Mesarovic, S.D. and Fleck, N.A., 2000, “Frictionless indentation of dissimilar elastic-plastic spheres”, *Int J. Solids struc.* **37**, pp 7071-7091
- Moore, A.J.W., 1949, “Deformation of metals in static and in sliding contact”, *Proc.Royal Soc. Lond.* **195A**, pp 231-244
- Nayak, P.R., 1971, “Random process model of rough surfaces”, *J. Lub. Tech.* **93**, pp 398-407
- Onions, R.A. and Archard, J.F., 1973, “The contact of surface having a random structure”, *J. Phys. D: App. Phys.* **6**, pp 289-304
- Pullen, J. and Williamson, J.B.P., 1972, “On the plastic contact of rough surfaces”, *Proc.Royal Soc. Lond.* **327A**, pp 159-173
- Song, J.F. and Vorburger, T.V., 1992, “Surface texture, ASM handbook”, *ASM, NewYork*
- Tabor, D., 1951, “The Hardness of Metals”, *Oxford University Press, Oxford, UK*

Tsukizoe, T. and Hisakado, T., 1965, "On the mechanism of contact between metal surfaces- the penetrating depth and the average clearance", *J. Basic Eng.* **87**, pp 666-674

Tsukizoe, T. and Hisakado, T., 1968, "On the mechanism of contact between metal surfaces; Part 2, The real area and the number of contact points", *J. Lub.Tech.* **90**, pp 81-88

Whitehouse, D.J. and Archard, J.F., 1970, "The properties of random surfaces of significance in their contact", *Proc. Royal Soc. Lond.* **316A**, pp 97-121

Woo, K.L. and Thomas, T.R., 1980, "Contact of rough surfaces: A review of experimental work", *Wear* **58**, pp 109-116

Zhao, Y., Maietta, D. M., dan Chang, L., 2000, "An Asperity Microcontact Model Incorporating the Transition From Elastic Deformation to Fully Plastic Flow", *ASME Journal of Tribology* **109**, pp. 86-93.

[www.partsengine.com](http://www.partsengine.com), 17-6-2010

## DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

Abidin, Z., Setiawan, J.D., Jamari (2010), “Studi pengaruh beban terhadap deformasi plastis pada kontak antara *sphere* dengan *rough surface*”, *Majalah Ilmiah Momentum FT. Unwahas* – ISSN 0216.7395. (submitted).

Abidin, Z., Setiawan, J.D., Jamari (2010), “Studi eksperimen dan *finite element* terhadap deformasi plastis pada *rough surface*”, *Majalah Ilmiah Momentum FT. Unwahas* – ISSN 0216.7395. (submitted).

Abidin, Z., Setiawan, J.D., Jamari (2010), “Studi pengaruh ketebalan *substrate* terhadap deformasi plastis pada kontak antara *sphere* dengan *rough surface*”, *Jurnal Rekayasa Mesin Polines* – ISSN 1411.6863. (submitted).

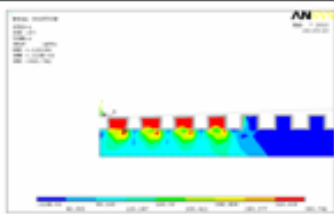
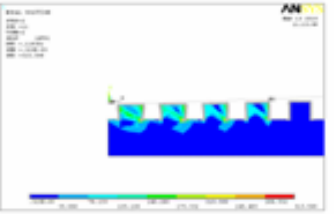
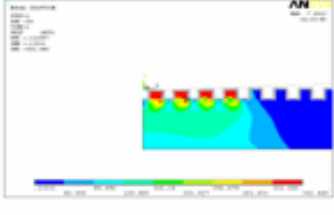
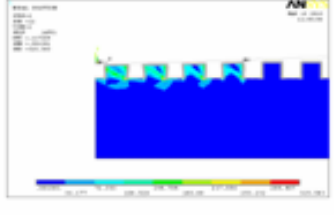
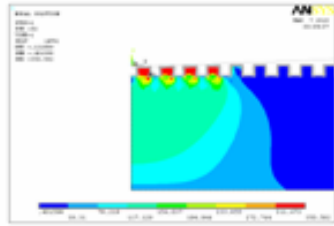
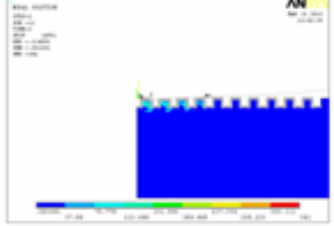
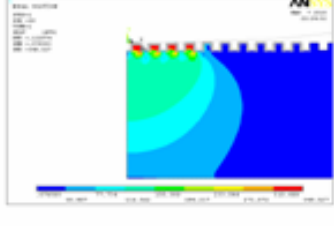
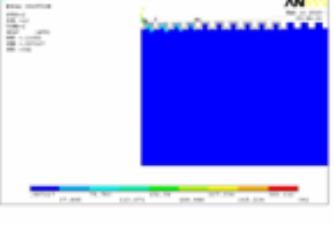
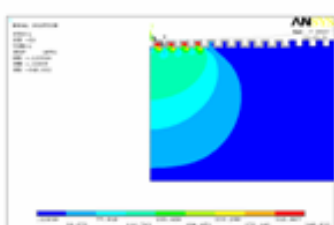
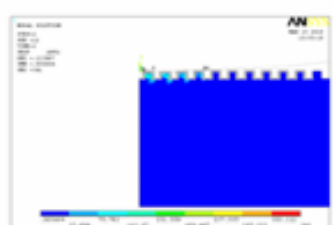
Abidin, Z., Setiawan, J.D., Jamari (2010), “Pemodelan deformasi plastis pada kontak antara *sphere* dengan *rough surface* dengan analisa elemen hingga”, *Jurnal Rekayasa Mesin Polines* – ISSN 1411.6863. (submitted).

# LAMPIRAN

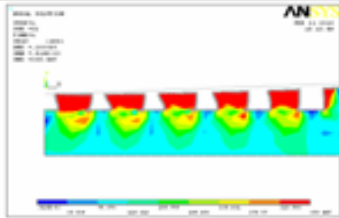
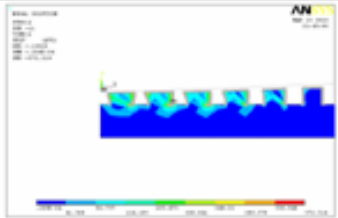
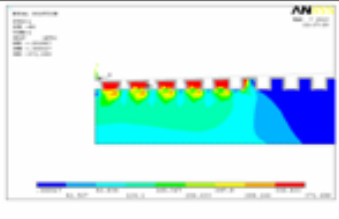
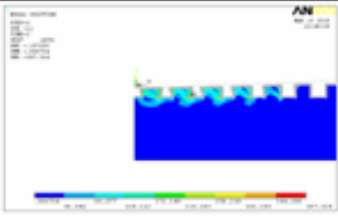
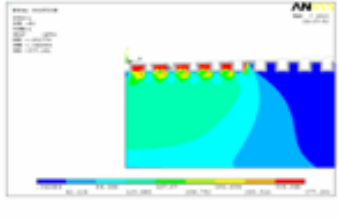
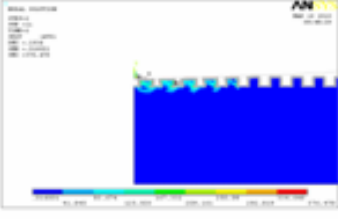
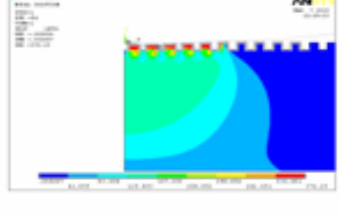
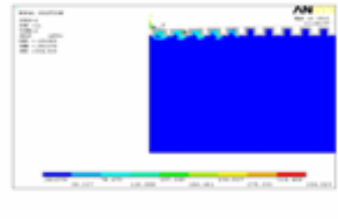
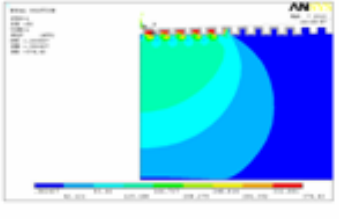
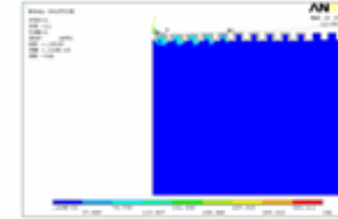
Lampiran A: Hasil Plot *Von Mises Stress* dari FEM ANSYS 9.0 untuk *Load* 8000 N saat *Loading* dan *Unloading*.

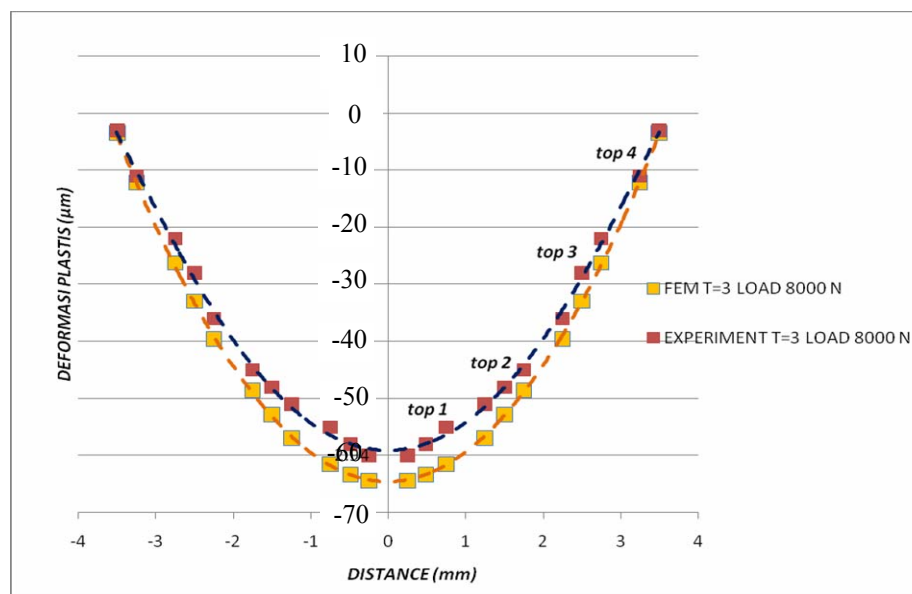
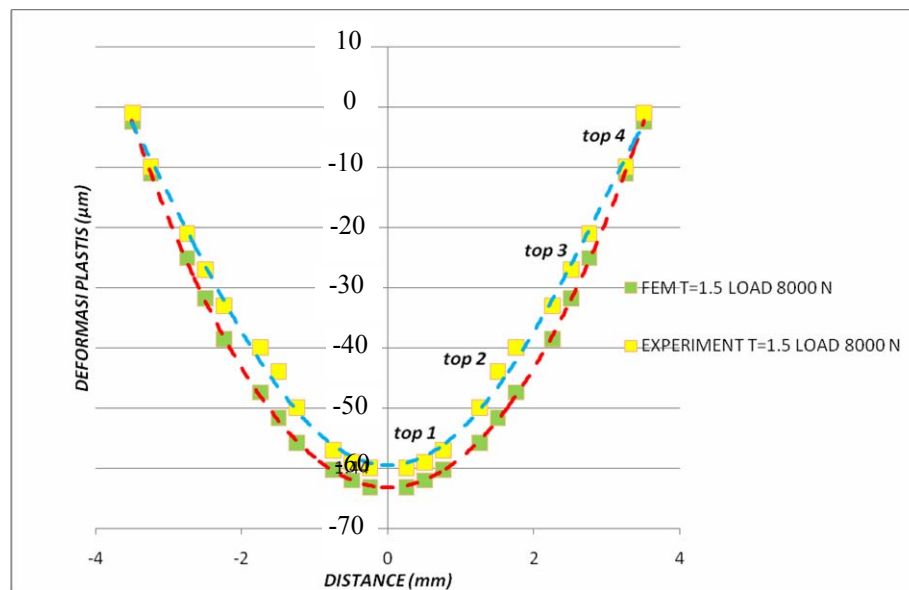
| <i>thickness</i>  | <i>Load = 8000 Loading</i> | <i>Load = 8000 Unloading</i> |
|-------------------|----------------------------|------------------------------|
| <b>T = 1.5 mm</b> |                            |                              |
| <b>T = 3 mm</b>   |                            |                              |
| <b>T = 6 mm</b>   |                            |                              |
| <b>T = 9 mm</b>   |                            |                              |
| <b>T = 12 mm</b>  |                            |                              |

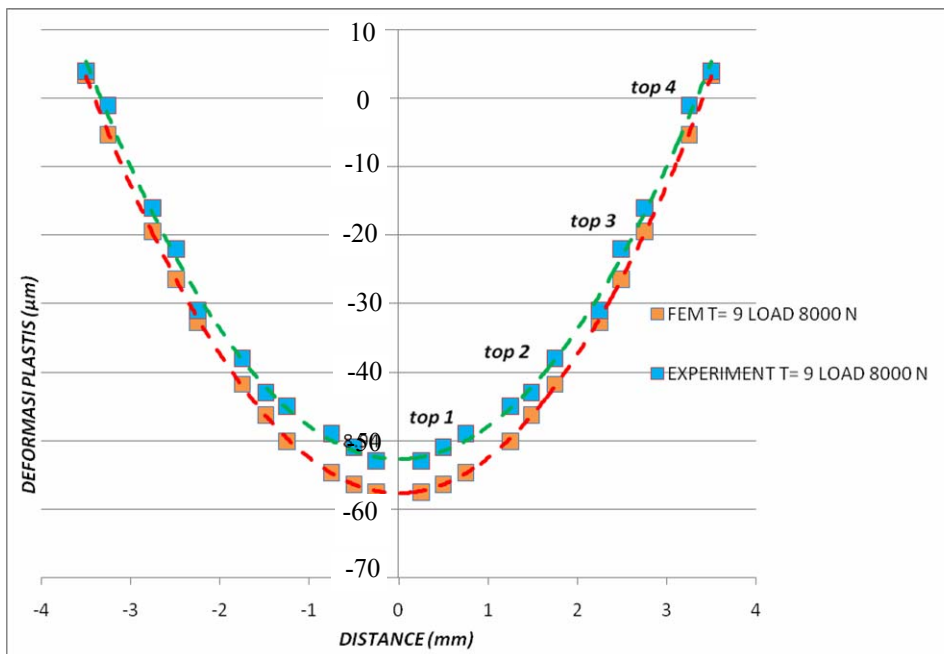
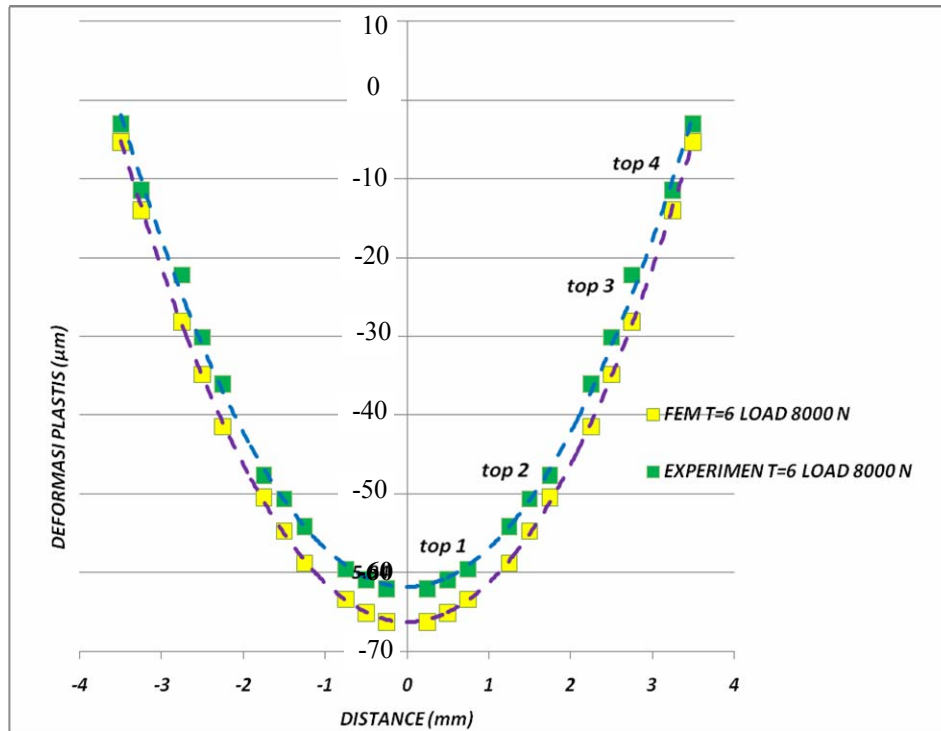
Lampiran B: Hasil Plot *Von Mises Stress* dari FEM ANSYS 9.0 untuk *Load* 11000 N saat *Loading* dan *Unloading*.

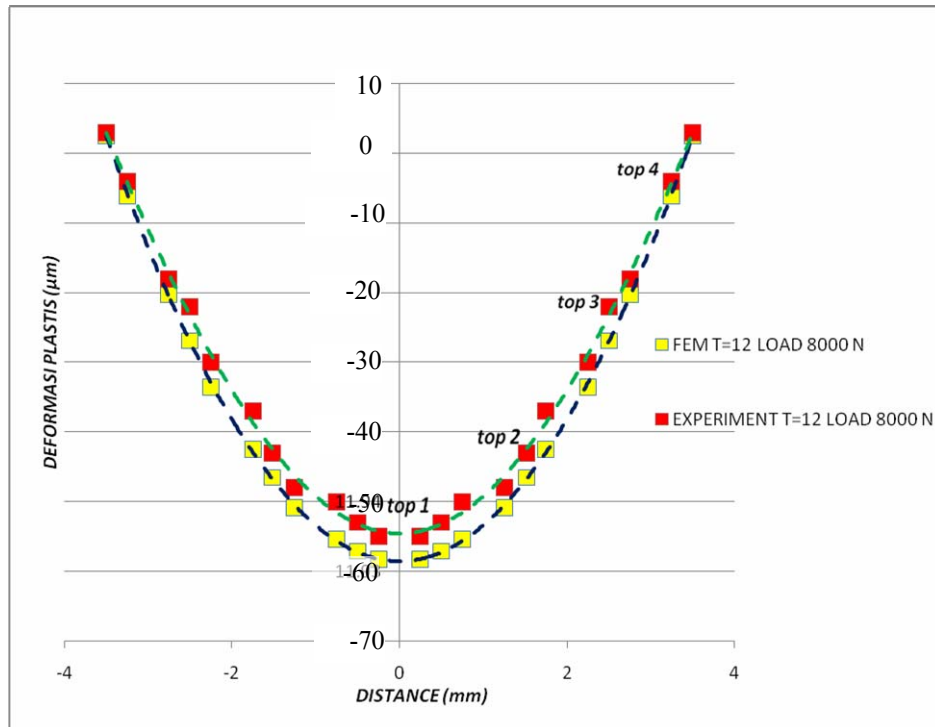
| <i>Thickness</i>  | <i>Load = 11000 Loading</i>   | <i>Load = 11000 Unloading</i>  |
|-------------------|---|--|
| <b>T = 1.5 mm</b> |    |    |
| <b>T = 3 mm</b>   |    |    |
| <b>T = 6 mm</b>   |   |   |
| <b>T = 9 mm</b>   |  |  |
| <b>T = 12 mm</b>  |  |  |

Lampiran C: Hasil Plot *Von Mises Stress* dari FEM ANSYS 9.0 untuk *Load 20000 N* saat *Loading* dan *Unloading*

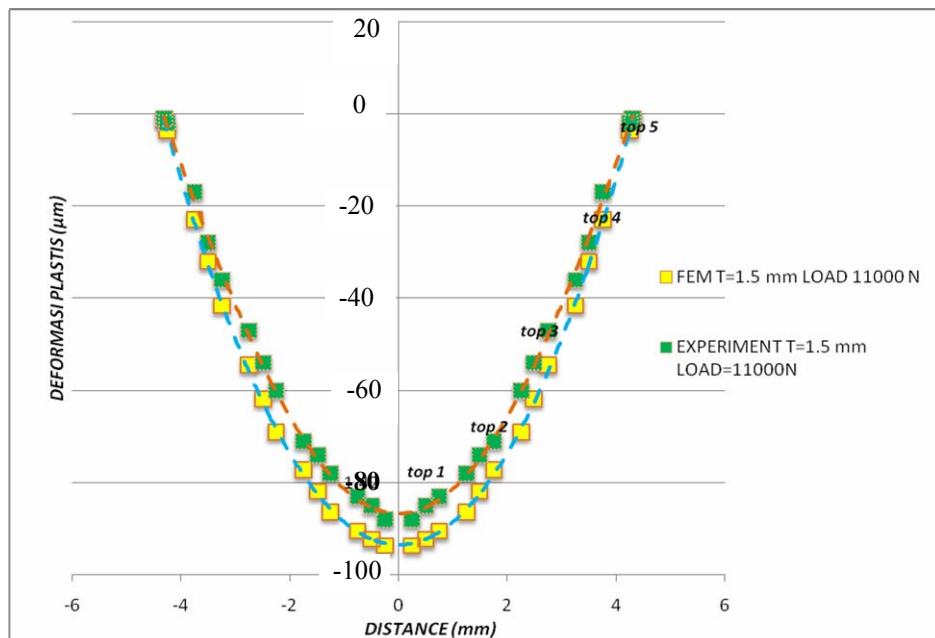
| <i>thickness</i>  | <i>Load = 20000 Loading</i>   | <i>Load = 20000 Unloading</i>  |
|-------------------|---|--|
| <b>T = 1.5 mm</b> |    |    |
| <b>T = 3 mm</b>   |    |    |
| <b>T = 6 mm</b>   |   |   |
| <b>T = 9 mm</b>   |  |  |
| <b>T = 12 mm</b>  |  |  |

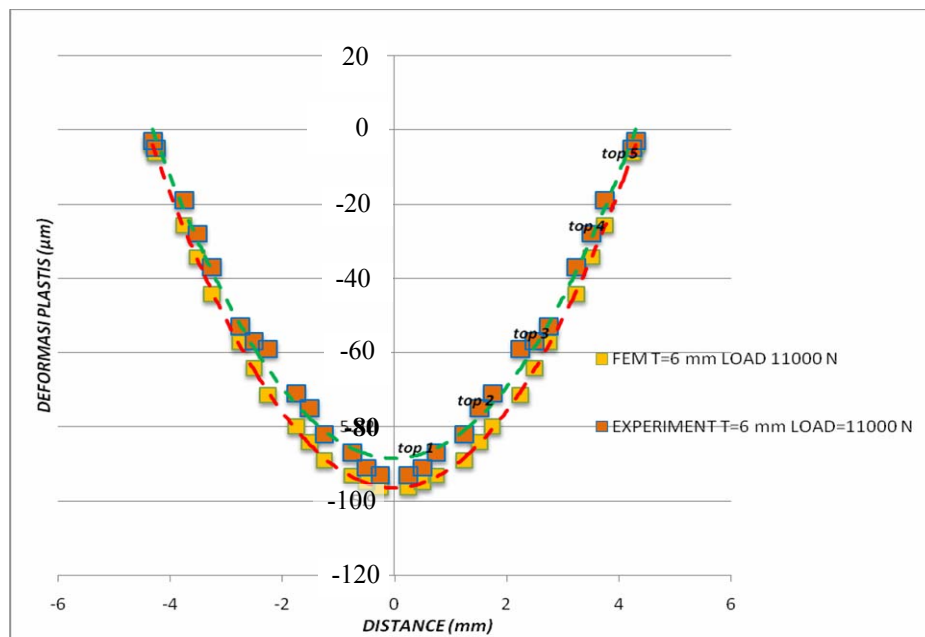
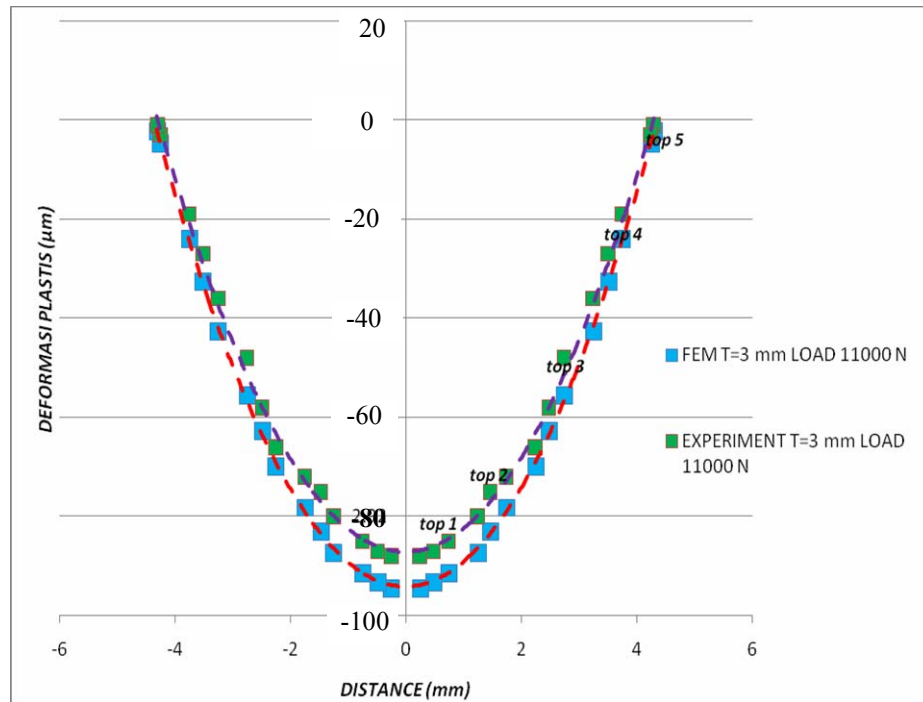
**Lampiran D: Hasil Simulasi dan Eksperimen.****i. Untuk Beban 8000 N**

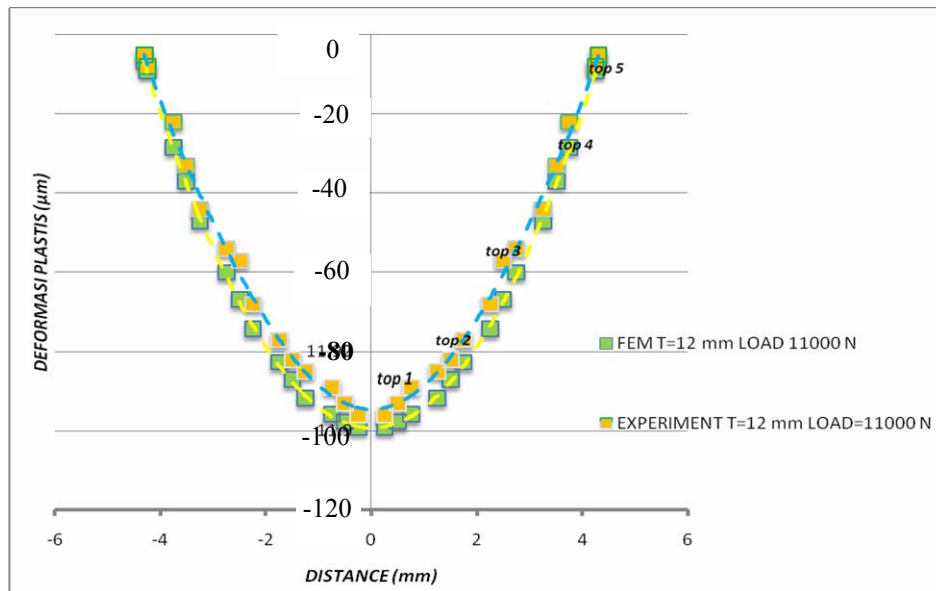
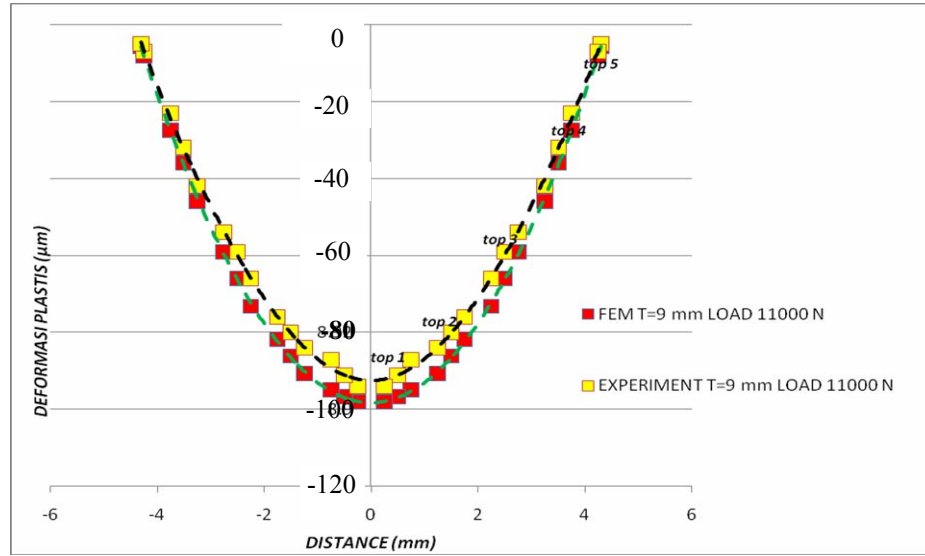




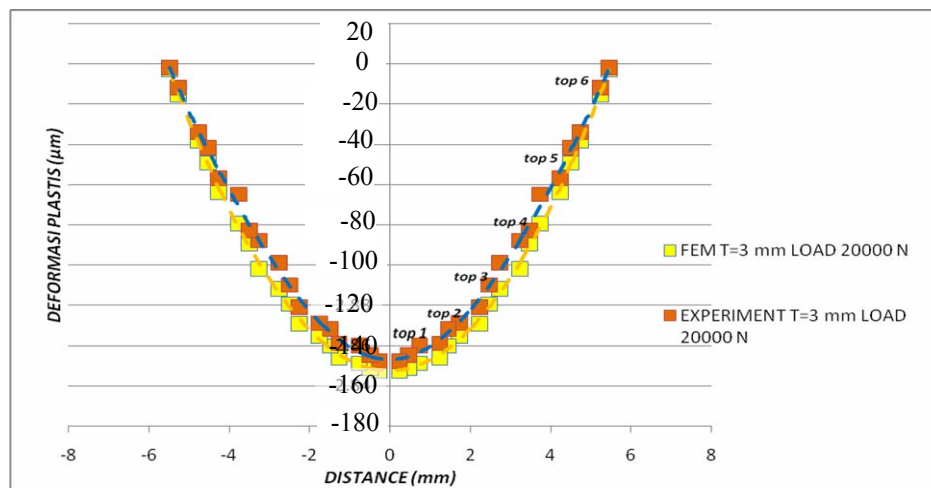
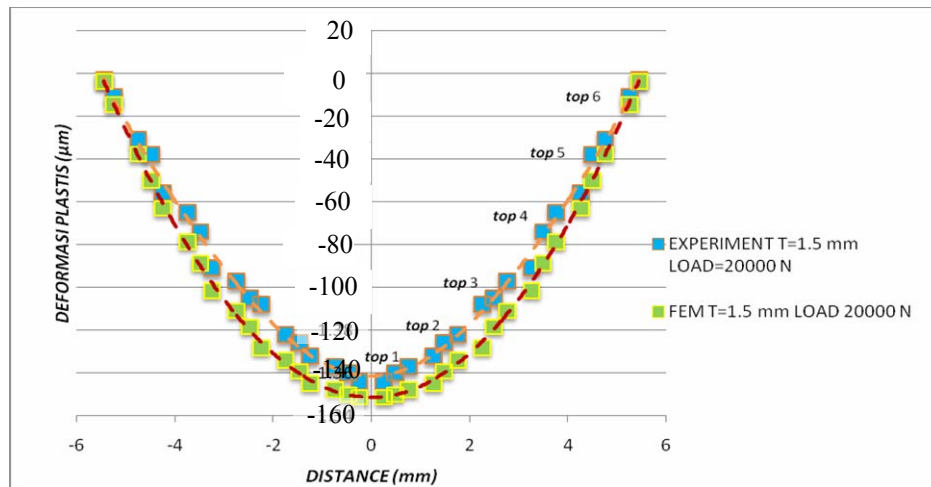
ii. Untuk Beban 11000 N

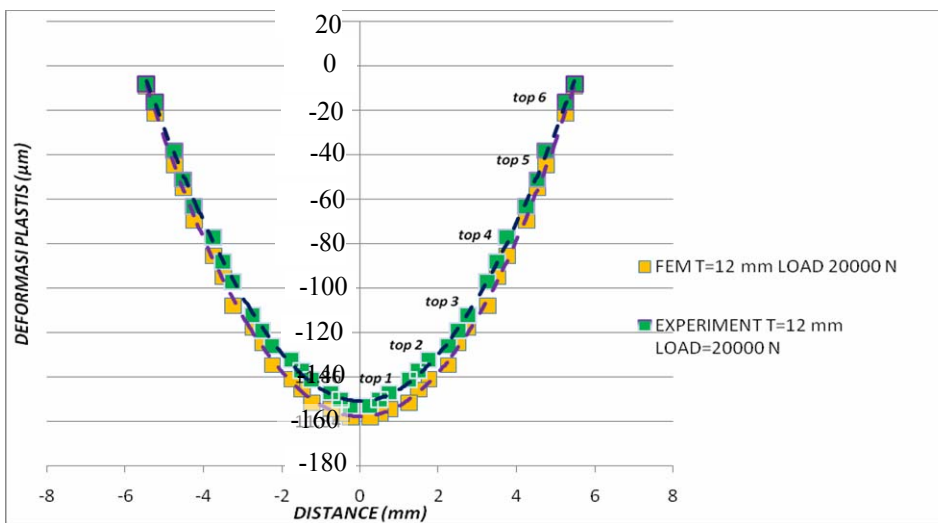
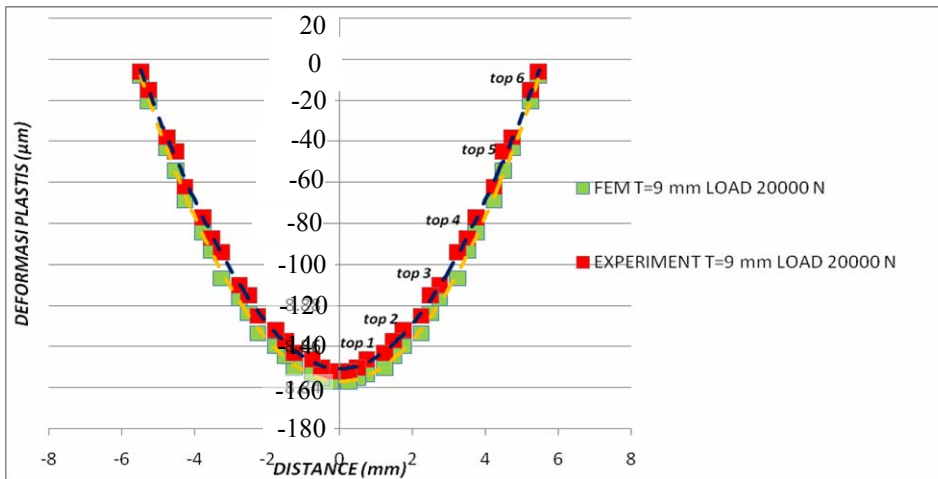
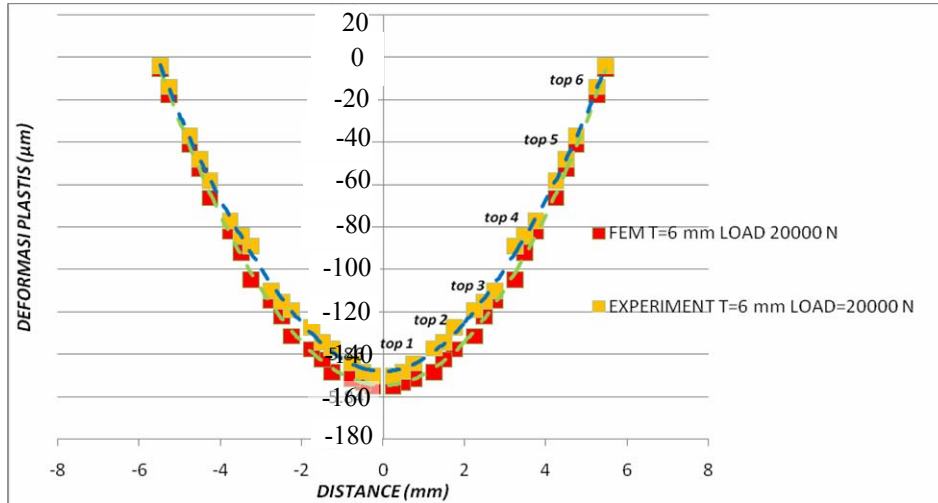




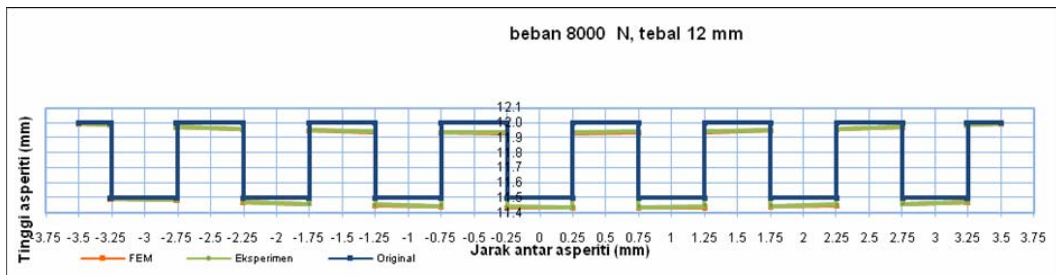
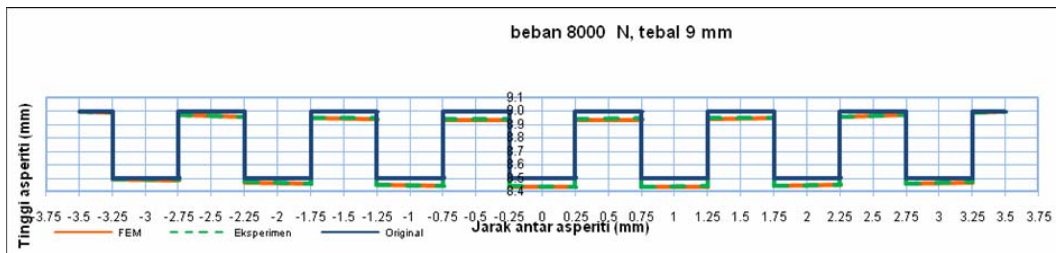
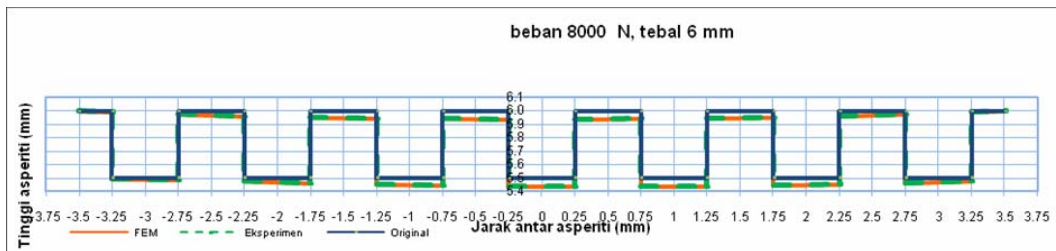
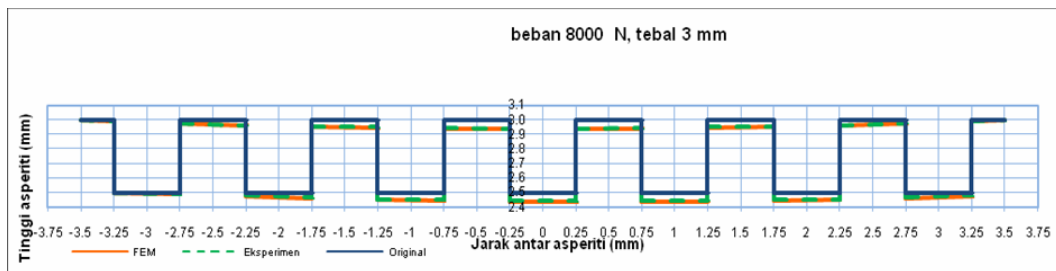
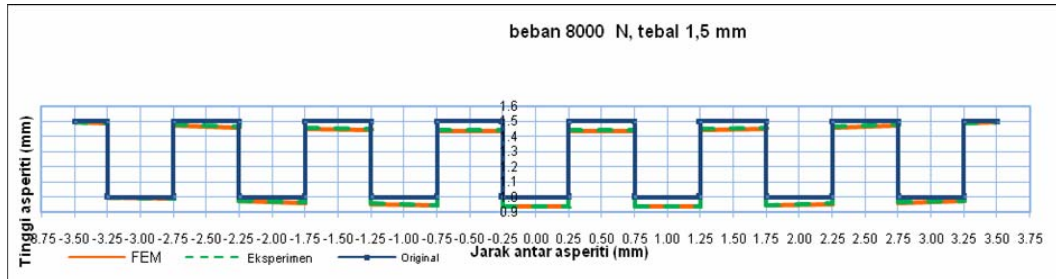


iii. Untuk Beban 20000 N

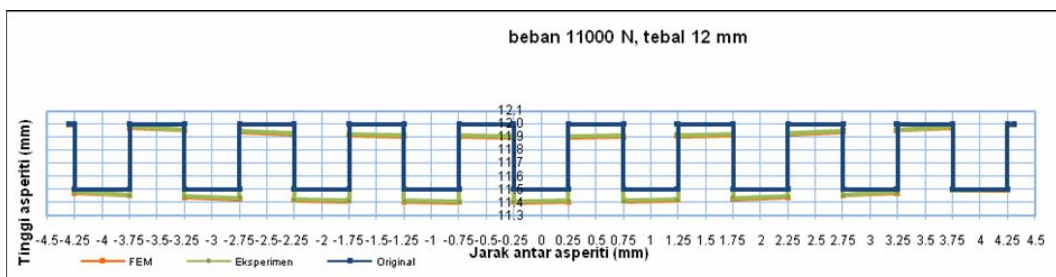
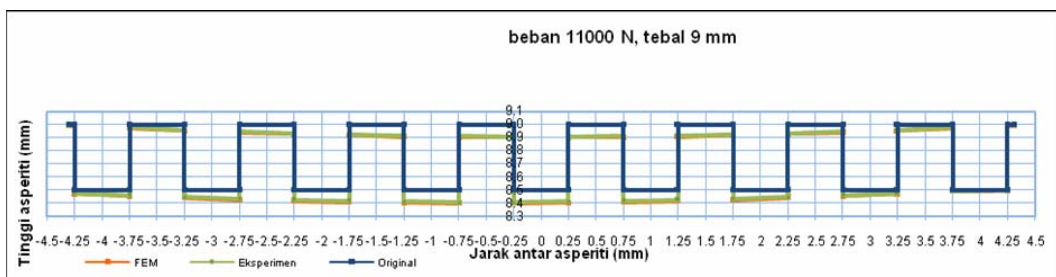
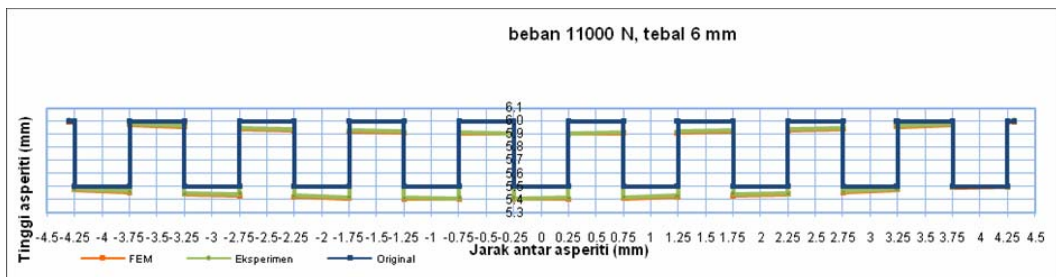
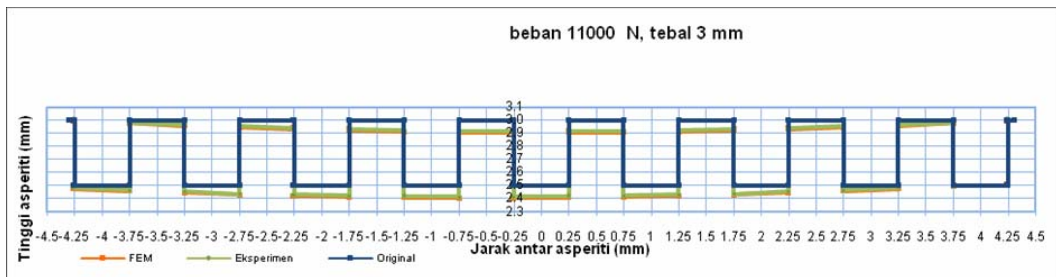
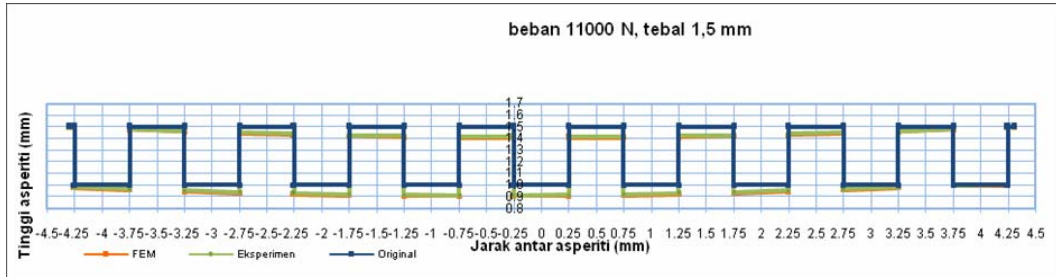




**Lampiran E: Hasil Deformasi FEM dan Eksperimen pada Real Surface**  
**A. Untuk Beban 8000 N**



**B. Untuk Beban 11000 N**



C. Untuk Beban 20000 N

