

ANALISA DEFORMASI PLASTIS PADA KONTAK ANTAR ASPERITI: MODEL DAN EKSPERIMEN



TESIS

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

Disusun oleh:

**Bambang Singgih Hardjuno
NIM. L4E 007 004**

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

ANALISA DEFORMASI PLASTIS PADA KONTAK ANTAR ASPERITI: MODEL DAN EKSPERIMEN

Disusun oleh:

Bambang Singgih Hardjuno
NIM. L4E 007 004

Program Studi Magister Teknik Mesin
Program Pascasarjana Universitas Diponegoro

Menyetujui

Tanggal, 20 Agustus 2010

Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin

Dr. Ir. A. P. 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

ANALISA DEFORMASI PLASTIS PADA KONTAK ANTAR ASPERITI: MODEL DAN EKSPERIMEN

Bambang Singgih Hardjuno
NIM. L4E 007 004

Diskusi tentang gesekan, keausan, dan pelumasan dalam skala mikro permukaan yang menggabungkan teknik pengetahuan tentang deformasi asperiti. *Running-in* adalah cara efektif untuk menyesuaikan parameter teknik antara dua permukaan komponen dalam situasi kontak *rolling* dan/atau *sliding*. Terdapat banyak parameter kimia dan mekanik mengubah geometri-mikro pada permukaan selama fase *running-in*. Dalam studi perubahan parameter mekanik pada rekayasa permukaan dalam fase *running-in*, ada dua mekanisme dominan: deformasi plastis dan keausan lembut. Selama fase ini, puncak yang lebih tinggi atau asperiti permukaan kasar, yang dihasilkan oleh proses pemesinan, dikurangi dengan mekanisme aliran plastis. Lembah diisi dan kesesuaian permukaan diperoleh. Pemahaman tentang mengurangi/memotong asperiti yang lebih tinggi dalam fase *running-in* diperlukan dalam mengoptimalkan topografi permukaan dan pemilihan proses pemesinan.

Untuk memahami fenomena tersebut di atas, dilakukan studi literatur dan beberapa model yang diusulkan ditemukan. Para peneliti meneliti situasi kontak antara material keras-lembut dan dua benda mampudeformasi. Salah satu peneliti, Johnson dan Shercliff menyimpulkan bahwa kontak antara dua asperiti dengan kekerasan yang sama akan menghasilkan deformasi plastis yang sama tanpa mempertimbangkan geometri.

Tesis ini membahas kesimpulan dari Johnson dan Shercliff dengan melakukan percobaan dan pemodelan elemen hingga. Dua *hemisphere* dari bahan *brass* dengan tujuh rasio radius yang berbeda (R_1/R_2) dikontakkan dan diberi beban. Beban kontak adalah 8000 N dan 11000 N dan menghasilkan deformasi plastis. Sebuah kurva *non-linear* yang menggambarkan hubungan antara deformasi plastis kontak *hemisphere* dan rasio radius dilakukan. Kurva ini tidak setuju dengan kesimpulan dari Johnson dan Shercliff. Deformasi plastis menurun ketika rasio radius meningkat yang menggambarkan bahwa deformasi plastis dari kontak dua asperiti dipengaruhi oleh geometri dari asperiti.

Kata kunci: asperiti, deformasi plastis, mekanika kontak, *running-in*

ABSTRACT

PLASTIC DEFORMATION ANALYSIS OF CONTACT BETWEEN ASPERITIES: MODEL AND EXPERIMENT

Bambang Singgih Hardjuno
NIM. L4E 007 004

The discussion of friction, wear, and lubrication in micro-scale of an engineering surface incorporates the knowledge about the asperity deformation. Running-in is an effective way to adjust the engineering surface parameters between two contacted components in rolling and/or sliding situations. There are many chemical and mechanical parameters change on the micro-geometry of the surface during the running-in phase. In the study of mechanical parameter change on the engineering surface in running-in phase, there are two dominant mechanisms: plastic deformation and mild wear. During this phase, the higher peaks or asperity of the rough surface, produced by machining process, is reduced by plastic flow mechanism. The valleys are filled and the surface conformity is obtained. The understanding of the reducing/truncating the higher asperity in running-in phase is required in optimizing the surface topography and machining selection.

In order to understand the aforementioned phenomena, the literature studies were conducted and some proposed models were found. Researchers investigated the contact situation between the hard-soft material and two deformable bodies. One of the researchers, Johnson and Shercliff concluded that the contact between two asperities with the same hardness number will produce the same plastic deformation without considering the geometries.

This thesis explores the conclusion of Johnson and Shercliff by conducting the experiments and finite element modeling. Two brass hemispheres with seven different radius ratios (R_1/R_2) were contacted and loaded. The contacting loads were 8000 N and 11000 N and resulted plastic deformation. A non-linear curve which depicts the relation between plastic deformation of the contacted hemisphere and its radius ratio is performed. This curve does not agree with the conclusion of Johnson and Shercliff. The plastic deformation decreases when the radius ratio increases which describes that the plastic deformation of two contacted asperities is affected by the geometry of the asperities.

Keywords: *asperity, plastic deformation, contact mechanics, running-in*

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 kepada Yang Maha Kuasa atas segala kemudahan yang selalu penulis terima, diantaranya keberhasilan penelitian yang berjudul “ANALISA DEFORMASI PLASTIS PADA KONTAK ANTAR ASPERITI: MODEL DAN EKSPERIMEN” ini. Penulisan Tesis ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan banyak 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 karyawan Program Pascasarjana Jurusan Teknik Mesin UNDIP, yang telah mendukung proses belajar mengajar penulis.
- Seluruh rekan dosen dan karyawan 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, Agustus 2010
Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
PEDOMAN PENGGUNAAN TESIS.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR LAMPIRAN.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG.....	xiv
Bab 1 PENDAHULUAN.....	1
1. 1 Latar Belakang.....	1
1. 1. 1 Tribologi.....	1
1. 1. 2 <i>Running-in</i>	2
1. 2 Originalitas Penelitian.....	7
1. 3 Pembatasan Masalah.....	8
1. 4 Tujuan Penelitian.....	8
1. 5 Manfaat Penelitian.....	8
1. 6 Metodologi Penelitian.....	9
1. 7 Sistematika Tesis.....	10
Bab 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	11
2. 1 Pengenalan.....	11
2. 2 <i>Running-in</i> pada Dua Permukaan yang Dapat Terdeformasi.....	11
2. 3 Kontak Permukaan Bola.....	12
2. 4 Hipotesis Johnson, K. L. – Shercliff, H. R.	13
2. 5 Eksperimen Jamari.....	15
2. 6 Ringkasan.....	16
Bab 3 PEMODELAN MENGGUNAKAN METODA ELEMEN HINGGA.....	17
3. 1 Pengertian Metoda Elemen Hingga.....	17
3. 2 Langkah-langkah Umum Metode Elemen Hingga.....	18
3. 2. 1 Langkah 1 Diskritisasi dan Memilih Tipe Elemen.....	19
3. 2. 2 Langkah 2 Memilih Fungsi Perpindahan.....	21
3. 2. 3 Langkah 3 Menentukan Regangan/Perpindahan dan Tegangan-Regangan.....	22
3. 2. 4 Langkah 4 Menurunkan Matrik Kekakuan Elemen dan Persamaan.....	22
3. 2. 5 Langkah 5 Merakit Persamaan Elemen untuk Mendapatkan Persamaan Global atau Total dan Memperkenalkan Kondisi Batas.....	23

3. 2. 6	Langkah 6 Penyelesaian untuk Derajat Kebebasan yang Tidak Diketahui (atau perpindahan umum)	24
3. 2. 7	Langkah 7 Penyelesaian untuk Regangan dan Tegangan Elemen.....	25
3. 2. 8	Langkah 8 Menginterpretasikan Hasil	25
3. 3	Pengaplikasian Metoda Elemen Hingga	25
3. 3. 1	Spesifikasi Masalah	25
3. 3. 2	Prosedur Pemodelan Metoda Elemen Hingga	26
3. 3. 3	Simulasi.....	57
Bab 4	EKSPERIMEN	63
4. 1	Prosedur Eksperimen	63
4. 2	Spesimen.....	64
4. 3	Peralatan Pendukung.....	64
4. 4	Detail Eksperimen.....	64
Bab 5	HASIL DAN PEMBAHASAN	69
5. 1	Hasil Simulasi	69
5. 1. 1	Simulasi untuk Beban 8000 N tanpa Gesekan.....	69
5. 1. 2	Simulasi untuk Beban 8000 N dengan Gesekan.....	70
5. 1. 3	Simulasi untuk Beban 11000 N dengan Gesekan.....	71
5. 2	Hasil Eksperimen.....	73
5. 2. 1	Hasil Pengukuran Spesimen untuk Beban 8000 N tanpa Gesekan	73
5. 2. 2	Hasil Pengukuran Spesimen untuk Beban 8000 N dengan Gesekan	74
5. 2. 3	Hasil Pengukuran Spesimen untuk Beban 11000 N dengan Gesekan	76
5. 3	Perbandingan Hasil Simulasi dengan Hasil Eksperimen.....	78
5. 3. 1	Perbandingan pada Beban 8000 N tanpa Gesekan	78
5. 3. 2	Perbandingan pada Beban 8000 N dengan Gesekan.....	79
5. 3. 3	Perbandingan pada Beban 11000 N dengan Gesekan.....	80
Bab 6	KESIMPULAN DAN SARAN	81
6. 1	Kesimpulan	81
6. 1. 1	Pembuktian Hipotesis Johnson, K. L. dan Shercliff, H. R.....	81
6. 1. 2	Verifikasi Terhadap Pernyataan Johnson, K. L. dan Shercliff, H. R. dengan Jamari.....	81
6. 1. 3	Hubungan Antara Rasio Deformasi dengan Rasio Radius Spesimen	82
6. 2	Saran	82
	DAFTAR PUBLIKASI.....	83
	DAFTAR PUSTAKA	84

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A: Kekerasan Spesimen.....	88
Lampiran B: Deformasi.....	89
Lampiran C: Pemberian Beban/Penekanan Spesimen pada Mesin Uji Tekan.....	92
Lampiran D: Tujuh macam pasangan spesimen (R_1/R_2).....	93

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1	Ilustrasi aplikasi tribologi.....	2
Gambar 1. 2	Skema representasi dari perilaku keausan sebagai fungsi dari waktu, jumlah <i>overrolling</i> atau jarak kontak <i>sliding</i> dalam kondisi operasi konstan (Jamari, 2006).	4
Gambar 1. 3	Pengaruh <i>running-in</i> pada profil permukaan, (Whitehouse, 1994).	6
Gambar 1. 4	Permukaan benda dan asperiti, (Jamari, 2006).....	7
Gambar 1. 5	Diagram alir metodologi penelitian.....	9
Gambar 2. 1	Rasio deformasi plastis sebagai fungsi dari rasio radius benda kontak, hasil eksperimental dan kurva <i>fitting</i> (garis putus-putus), (Jamari, 2006).....	15
Gambar 3. 1	Berbagai jenis elemen hingga (Logan, D. L., 1992).	20
Gambar 3. 2	(a) Geometri pemodelan kontak dua spesimen (b) Geometri pemodelan simulasi.	26
Gambar 3. 3	<i>Create part dialog box</i>	27
Gambar 3. 4	<i>Geometri part 1</i>	28
Gambar 3. 5	<i>Create part dialog box</i>	28
Gambar 3. 6	<i>Geometri part 2</i>	29
Gambar 3. 7	<i>Edit material dialog box</i>	29
Gambar 3. 8	<i>Edit material dialog box</i>	30
Gambar 3. 9	<i>Create section dialog box</i>	31
Gambar 3. 10	<i>Edit section dialog box</i>	31
Gambar 3. 11	<i>Edit section assignment dialog box part 1</i>	32
Gambar 3. 12	<i>Part 1</i> setelah diberi sifat material.....	32
Gambar 3. 13	<i>Edit section assignment dialog box part 2</i>	33
Gambar 3. 14	<i>Part 2</i> setelah diberi sifat material.....	33
Gambar 3. 15	<i>Create instance dialog box</i>	34
Gambar 3. 16	<i>Assembly part 1 dan part 2</i>	34
Gambar 3. 17	<i>Create step dialog box</i>	35
Gambar 3. 18	<i>Edit step dialog box</i>	35
Gambar 3. 19	<i>Create step dialog box</i>	36
Gambar 3. 20	<i>Edit step dialog box</i>	36
Gambar 3. 21	<i>Create interaction dialog box</i>	37
Gambar 3. 22	<i>Edit interaction tool box</i>	37
Gambar 3. 23	<i>Create interaction property dialog box</i>	38
Gambar 3. 24	<i>Edit contact property dialog box</i>	38
Gambar 3. 25	<i>Plot contact</i>	39
Gambar 3. 26	<i>Create constraint dialog box</i>	39
Gambar 3. 27	<i>Coupling</i>	40
Gambar 3. 28	<i>Edit constraint</i>	40
Gambar 3. 29	<i>Reference point</i>	40
Gambar 3. 30	<i>Create load dialog box</i>	41
Gambar 3. 31	<i>Edit load dialog box</i>	41
Gambar 3. 32	Hasil akhir penentuan beban.	42
Gambar 3. 33	<i>Create boundary condition dialog box</i>	42

Gambar 3. 34	Garis horizontal yang dipilih.....	43
Gambar 3. 35	<i>Edit boundary condition dialog box</i>	43
Gambar 3. 36	Kondisi batas pada bagian bawah.....	44
Gambar 3. 37	<i>Create boundary condition dialog box</i>	44
Gambar 3. 38	Garis vertikal dan horizontal yang dipilih.....	45
Gambar 3. 39	<i>Edit boundary condition dialog box</i>	45
Gambar 3. 40	Kondisi batas pada bagian garis simetri.....	45
Gambar 3. 41	<i>Load manager dialog box</i>	46
Gambar 3. 42	<i>Edit load dialog box</i>	46
Gambar 3. 43	<i>Global seeds</i>	47
Gambar 3. 44	Hasil <i>global meshing</i>	47
Gambar 3. 45	Pembuatan partisi.....	48
Gambar 3. 46	Hasil pembuatan partisi.....	48
Gambar 3. 47	Pembuatan <i>mesh</i> lembut pada partisi.....	49
Gambar 3. 48	<i>Mesh control dialog box</i>	49
Gambar 3. 49	<i>Element type dialog box</i>	50
Gambar 3. 50	Hasil akhir <i>mesh</i> pada <i>hemisphere</i>	51
Gambar 3. 51	<i>Create job dialog box</i>	51
Gambar 3. 52	<i>Edit job dialog box</i>	52
Gambar 3. 53	<i>Job manager dialog box</i>	52
Gambar 3. 54	<i>Job monitor dialog box</i>	53
Gambar 3. 55	<i>Create display group dialog box</i>	54
Gambar 3. 56	<i>Query dialog box</i>	54
Gambar 3. 57	Pengukuran deformasi pada R_1 (ω_{R1}).....	55
Gambar 3. 58	<i>Create display group dialog box</i>	55
Gambar 3. 59	<i>Query dialog box</i>	56
Gambar 3. 60	Pengukuran deformasi pada R_2 (ω_{R2}).....	56
Gambar 3. 61	Variasi perbandingan R_1/R_2 : (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4, (e) 5, (f) 6, (g) 7.....	57
Gambar 3. 62	Diagram alir simulasi elemen hingga.....	58
Gambar 3. 63	Pada $R_1/R_2 = 1$ (a) Distribusi tegangan, (b) Deformasi kontak.....	59
Gambar 3. 64	Pada $R_1/R_2 = 2$ (a) Distribusi tegangan, (b) Deformasi kontak.....	59
Gambar 3. 65	Pada $R_1/R_2 = 3$ (a) Distribusi tegangan, (b) Deformasi kontak.....	60
Gambar 3. 66	Pada $R_1/R_2 = 4$ (a) Distribusi tegangan, (b) Deformasi kontak.....	60
Gambar 3. 67	Pada $R_1/R_2 = 5$ (a) Distribusi tegangan, (b) Deformasi kontak.....	61
Gambar 3. 68	Pada $R_1/R_2 = 6$ (a) Distribusi tegangan, (b) Deformasi kontak.....	61
Gambar 3. 69	Pada $R_1/R_2 = 7$ (a) Distribusi tegangan, (b) Deformasi kontak.....	62
Gambar 4. 1	Mesin uji tekan.....	63
Gambar 4. 2	Spesimen.....	64

Gambar 4. 3	Pengarah, spesimen, dan pemegang.	64
Gambar 4. 4	<i>Micrometer</i> dan <i>center locator</i>	65
Gambar 4. 5	Pengukuran spesimen sebelum diuji.	66
Gambar 4. 6	Pemberian pelumas pada spesimen.	66
Gambar 4. 7	Pengukuran spesimen setelah diuji.	67
Gambar 4. 8	Diagram alir eksperimen.	68
Gambar 5. 1	Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 8000 N dan $\mu = 0$	69
Gambar 5. 2	Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 8000 N dan $\mu = 0,2$	70
Gambar 5. 3	Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 11000 N dan $\mu = 0,2$	71
Gambar 5. 4	Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 gabungan.	72
Gambar 5. 5	Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 8000 N tanpa gesekan.	73
Gambar 5. 6	Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 8000 N dengan gesekan.	75
Gambar 5. 7	Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 8000 N dengan dan tanpa gesekan.	75
Gambar 5. 8	Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 11000 N dengan gesekan.	77
Gambar 5. 9	Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 8000 N dan 11000 N.	77
Gambar 5. 10	Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 8000 N tanpa gesekan (hasil simulasi dan eksperimen).	78
Gambar 5. 11	Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 800 N dengan gesekan (hasil simulasi dan eksperimen).	79
Gambar 5. 12	Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 11000 N dengan gesekan (hasil simulasi dan eksperimen).	80

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Lokasi <i>keypoints number</i> untuk <i>part 1</i>	27
Tabel 3. 2 Lokasi <i>keypoints number</i> untuk <i>part 2</i>	29
Tabel 5. 1 Deformasi spesimen untuk beban 8000 N tanpa gesekan.....	69
Tabel 5. 2 Deformasi spesimen untuk beban 8000 N dengan $\mu = 0,2$	70
Tabel 5. 3 Deformasi spesimen untuk beban 11000 N dengan $\mu = 0,2$	71
Tabel 5. 4 Deformasi spesimen.....	72
Tabel 5. 5 Deformasi tiap spesimen untuk beban 8000 N tanpa gesekan.....	73
Tabel 5. 6 Deformasi tiap spesimen untuk beban 8000 N dengan gesekan.....	74
Tabel 5. 7 Deformasi tiap spesimen untuk beban 11000 N dengan gesekan.....	76

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN	Nama	Pemakaian pertama kali pada halaman
FEM	Finite element method	17
GOST	Gosudarstvennyi Standard	3
MEMS	Micro-electro-mechanical system	16
USSR	Union of Soviet Socialist Republics	3

LAMBANG	Nama	Satuan	Pemakaian pertama kali pada halaman
$\{d\}$	Vektor elemen yang tidak diketahui derajat kebebasan nodal		23
E	Modulus elastisitas	GPa	15
E_1	Modulus elastisitas spesimen 1	GPa	59
E_2	Modulus elastisitas spesimen 2	GPa	59
$\{f\}$	Vektor gaya nodal elemen		23
$\{F\}$	Vektor gaya nodal global		24
H	Kekerasan bahan	GPa	15
$[k]$	Matrik kekakuan elemen		23
$[K]$	Struktur global		24
L_{R1o}	Panjang spesimen 1 sebelum diuji	mm	67
L_{R1d}	Panjang spesimen 1 setelah diuji	mm	67
L_{R2o}	Panjang spesimen 2 sebelum diuji	mm	67
L_{R2d}	Panjang spesimen 2 setelah diuji	mm	67
R_1	Radius spesimen 1	mm	15
R_2	Radius spesimen 2	mm	15
Y	Yield strength	MPa	26
μ	Koefisien gesek		26
ν	Poisson's ratio		15
ν_1	Poisson's ratio spesimen 1		53
ν_2	Poisson's ratio spesimen 2		53
ω_{p1}	Deformasi plastis spesimen 1	mm	15
ω_{p2}	Deformasi plastis spesimen 2	mm	15

Bab 1 PENDAHULUAN

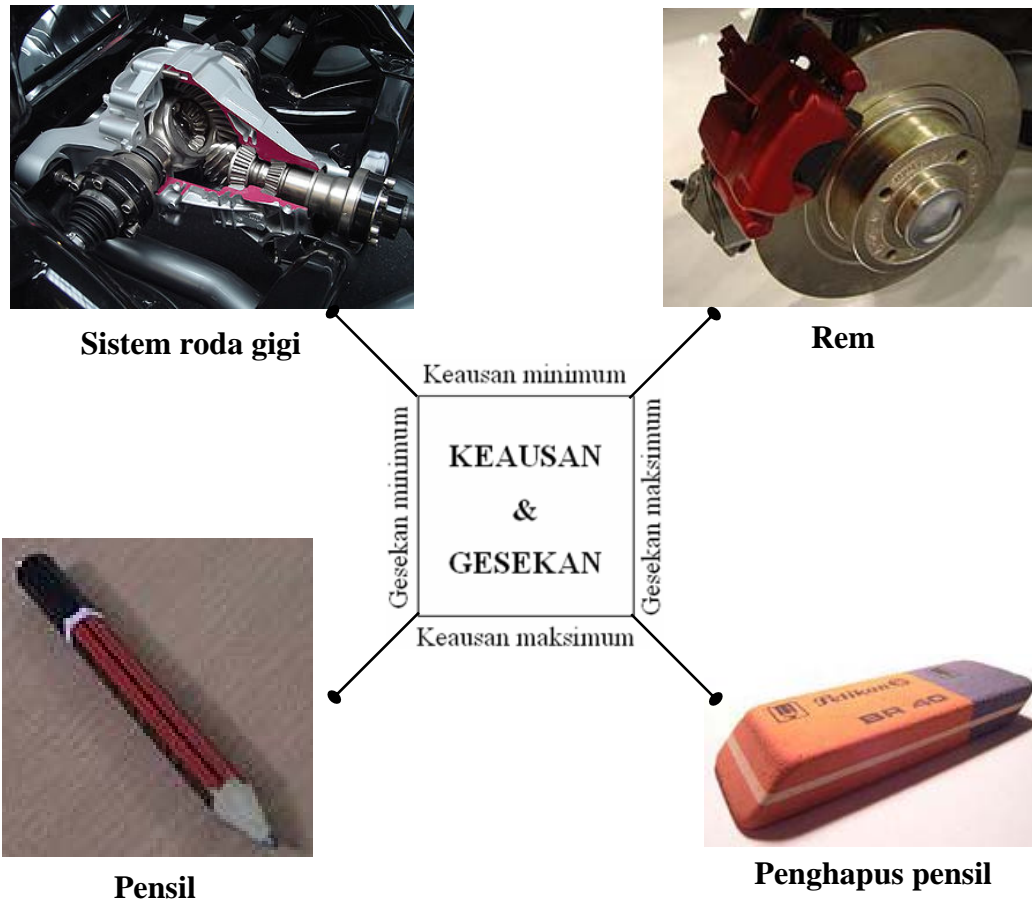
1.1 Latar Belakang

1.1.1 Tribologi

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*.

Konsep dasar tribologi adalah bahwa gesekan dan keausan yang terbaik dikendalikan dengan lapisan film tipis atau campur tangan dari bahan yang memisahkan *sliding* dan atau *rolling*. Hampir tidak ada pembatasan pada jenis bahan yang dapat membentuk seperti suatu film dan beberapa zat padat, cair dan gas sama-sama efektif. Jika tidak ada bahan film diberikan maka proses keausan sendiri dapat menghasilkan film pengganti. Tujuan tribologi adalah untuk mencari bahan film optimal untuk aplikasi tertentu, atau untuk memprediksi urutan kejadian ketika *sliding* atau *rolling* atau kontak kejut (*impacting contact*) yang dapat menghasilkan film sendiri.

Pengaplikasian dua aspek di atas pada akhirnya tribologi industri sangat menaruh perhatian pada permasalahan kontak antar permukaan, gesekan (*friction*), keausan (*wear*), dan pelumasan (*lubrication*) (Astakhov, V. P., 2007). Dalam terminologi sederhana tampak bahwa tujuan praktis tribologi adalah meminimalkan dua kelemahan utama kontak dua permukaan padat, yakni gesekan dan keausan, namun hal ini tidak selalu terjadi. Dalam beberapa situasi, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1.1, meminimalkan keausan dan memaksimalkan gesekan (pada sistem rem) atau meminimalkan gesekan dan meminimalkan keausan (pada bantalan dan sistem roda gigi) atau meminimalkan gesekan dan memaksimalkan keausan (pada pensil) atau memaksimalkan gesekan dan memaksimalkan keausan (pada penghapus pensil).



Gambar 1. 1 Ilustrasi aplikasi tribologi.

1. 1. 2 *Running-in*

Sebagai konsekuensi alami suatu interaksi dua permukaan yang saling bergerak relative akan berlangsung gesekan dan keausan antar muka. Gesekan dan keausan bukanlah sifat material, tetapi sifat sistem, tergantung material yang digunakan dan kondisi pengoperasian. Selama interaksi, beban diarahkan, energi mekanik terkonversi, sifat fisika dan kimia material yang saling berinteraksi diubah. Pada dasarnya ilmu tribologi dapat dimengerti melalui pemahaman sifat interaksi dan pemecahan masalah teknologi hubungannya dengan gejala antar permukaan. Kontak *rolling* salah satu solusi yang digunakan untuk mengendalikan gesekan dan keausan kaitannya dengan pembebanan antar permukaan pada dua permukaan yang dipisahkan oleh suatu bentuk *roll*.

Ketika dua permukaan diberi beban untuk pertama kali dan digerakkan relative satu terhadap yang lain, perubahan kondisi pada kedua

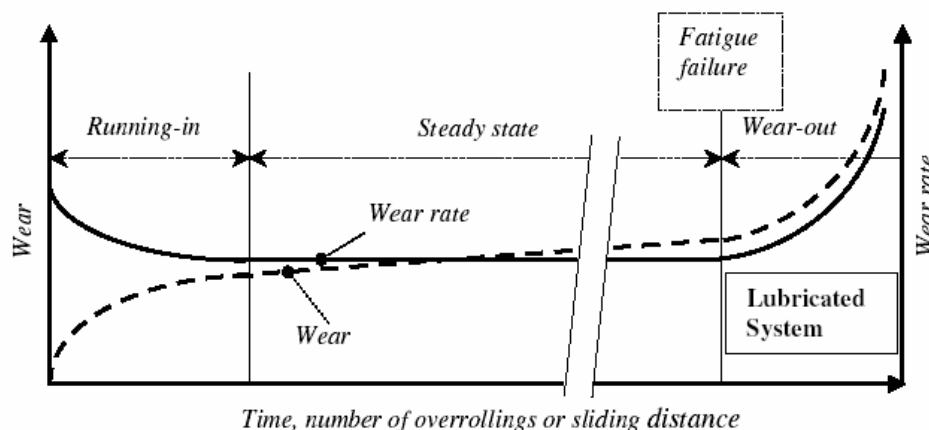
permukaan umumnya terjadi. Perubahan ini biasanya kombinasi dari banyak hal, seperti kesatusumbuan (*the alignment of axes*), perubahan bentuk, perubahan kekasaran permukaan, dan penyamaan (*equalizing*) berbagai sifat mekanik dan kimia antara permukaan kontak, seperti kekerasan mikro, dimana dihasilkan oleh pengerasan selektive (*selective work hardening*) atau formasi lapisan *oxide* dan lapisan batas lain. Semua perubahan ini diatur untuk memperkecil aliran energi, apakah mekanik atau kimia, antara permukaan kontak (Whitehouse, D. J., 1994). Perubahan dimana terjadi antara permulaan (*start-up*) dan keadaan seimbngag (*steady state*) kaitannya dengan *running-in* (*breaking-in* atau *wearing-in*). Walaupun dalam terminologi konservasi, keausan selalu tidak diinginkan, keausan *running-in* didukung dari pada dihindari (*encouraged rather than avoided*).

GOST (dahulu USSR) mendefinisikan *running-in* sebagai “Perubahan geometri permukaan *sliding* dan dalam sifat fisik-mekanik (*physicomechanical*) lapisan material permukaan selama perioda awal *sliding*, dimana biasanya menjelma dirinya sendiri (*manifests itself*), diumpamakan kondisi external tetap, pada penurunan dalam kerja gesekan (*the frictional work*), temperatur, dan laju keausan” (Kraghelsky, V. dkk., 1982). Summer-smith, J. D. (1994) mendefinisikan *running-in* sebagai “Kepindahan puncak permukaan (*high spots*) dalam permukaan kontak dengan keausan atau deformasi plastis di bawah kondisi terkendali memperbaiki keselarasan dan mengurangi resiko rusaknya lapisan selama operasi normal”. *Running-in* terjadi pada periode pertama dalam umur (*life-time*) kontak *rolling* atau *sliding* suatu sistem pelumasan, skemanya ditunjukkan pada Gambar 1.2.

Mekanisme *running-in*

Sebelum *running-in*, berbagai pasangan permukaan kontak bagian dalam, sebagai contoh, suatu mesin baru tidak serasi (*mated together*). Disana pada awalnya bisa terjadi ketidaksatusumbuan (*misalignment*) dan disana pasti akan terdapat puncak-puncak (*high spots*) pada semua permukaan. Awalnya ruang antara dua permukaan kontak (*clearance*) kecil dan oleh karena aliran pendingin kecil, bersamaan dengan gesekan awal lebih tinggi, mendorong temperatur operasi lebih tinggi dari pada normal. Selama perioda *running-in*, puncak-puncak

kekasaran hasil akhir proses pemesinan berkurang dengan mekanisme aliran plastis, lembah-lembah terisi dan semua bentuk menjadi saling selaras/sesuai (*matching*). Temperatur lebih tinggi umumnya disebabkan karena laju keausan (*wear rate*) lebih tinggi, tetapi permukaan menjadi lebih halus dan asperiti rata, laju keausan menurun menuju keadaan setimbang (*steady state*). Ada dua mekanisme utama dalam periode *running-in*; deformasi plastis dan pengausan lembut (*mild wear*) (Whitehouse, D. J., 1980). Mekanisme deformasi plastis mirip penghalusan bola (*roller burnishing*), asperiti ditekan kebawah. Perubahan topografi permukaan tergantung beban dan arah gerakan. Asperiti-asperiti yang lebih tinggi seolah-olah digosok. Kerugian gesekan umumnya menurun selama periode ini dan celah antar permukaan (*clearance*) bertambah, sehingga menurunkan temperatur permukaan. Laju keausan menurun hingga mencapai laju keausan normal yang stabil (*steady-state*) untuk suatu desain pasangan kontak. Laju keausan selama *running-in*, bahkan ketika ketidaksatusumbuan minimal, adalah lebih tinggi dari pada selama bergerak normal.



Gambar 1. 2 Skema representasi dari perilaku keausan sebagai fungsi dari waktu, jumlah *overrolling* atau jarak kontak *sliding* dalam kondisi operasi konstan (Jamari, 2006).

Setelah periode *running-in*, dimana jangka waktu tanpa alternatif tergantung pada sistem tribologi (*tribo-system*), kondisi-kondisi layanan penuh dapat diterapkan tanpa peningkatan laju keausan secara mendadak. Kapasitas kemampuan menahan beban meningkat ke desain operasi. Rezim mantap rendah (*steady low*) laju keausan menjaga untuk umur operasi yang direncanakan. Istilah

posisi mantap (*steady state*).didefinisikan sebagai kondisi sistem tribo (*tribo-system*) ditentukan dimana koefisien gesek dinamis rata-rata, laju keausan, dan parameter khusus lain sudah tercapai dan merawat suatu tingkatan yang konstan (Blau, P. J., 1989).

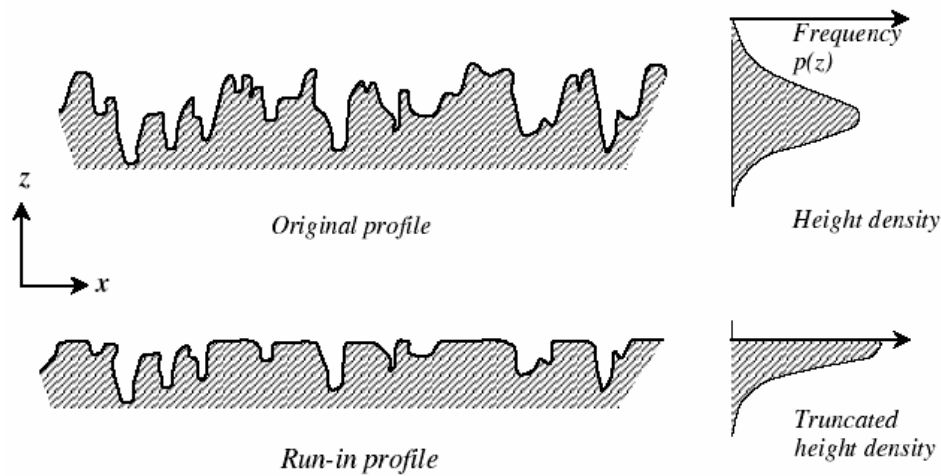
Laju keausan dapat naik sekali lagi ketika waktu operasi menjadi cukup lama untuk proses lelah ke terjadinya dalam lapisan atas permukaan yang terbebani. Suatu kontribusi penting kepada kerugian material/hilangnya material dikendalikan oleh pembebanan berulang dimulai. Partikel dari seperti proses aus lelah (*characteristically*) sangat lebih besar dari pada gabungan *fragment* kecil dengan *adhesive* atau keausan *abrasive* (Williams, J. A., 1994). Bentuk keausan menghasilkan bintik-bintik pada permukaan (kegagalan *pitting*). Sekali partikel keausan yang ada hubungannya dengan akumulasi keausan lelah permukaan, itu akan *wear out* yaitu kegagalan total terjadi.

Pemodelan *running-in*

Running-in adalah suatu cara yang efektif untuk penyesuaian kontak dua komponen dalam situasi fungsional *rolling* dan atau *sliding*. Seperti yang disebutkan dalam bagian sebelumnya ada banyak perubahan parameter selama *running-in*, kimiawi atau mekanis. Namun, perubahan geometri-mikro karena keausan atau deformasi plastis dominan.

Dua istilah yang terkait dengan *running-in* adalah pemotongan (*truncation*) asperiti dan *shakedown* elastis. Dalam pemotongan asperiti, kebanyakan studi telah dilakukan dengan pemodelan statistik pada permukaan komponen. Bentuk perubahan kurva distribusi amplitudo setelah *running-in* ditunjukkan dalam Gambar 1. 3. Orang akan berharap perubahan parameter permukaan seperti kekasaran statistik rata-rata, kekasaran *root-mean-square*, tinggi puncak ke lembah, lereng, dan sebagainya selama *running-in*. Namun, perubahan topografi permukaan sebenarnya tidak hanya distribusi tinggi (satu dimensi) tetapi perubahan dalam tiga dimensi agar sesuai satu sama lain. *Shakedown* elastis adalah proses dimana suatu permukaan yang awalnya menghasilkan plastis selama *running-in*, akhirnya mencapai batas *shakedown*

elastis dimana perilaku lapisan dekat permukaan tidak lagi plastis, tetapi telah mencapai kondisi yang memadai untuk mendukung tekanan kontak elastis.



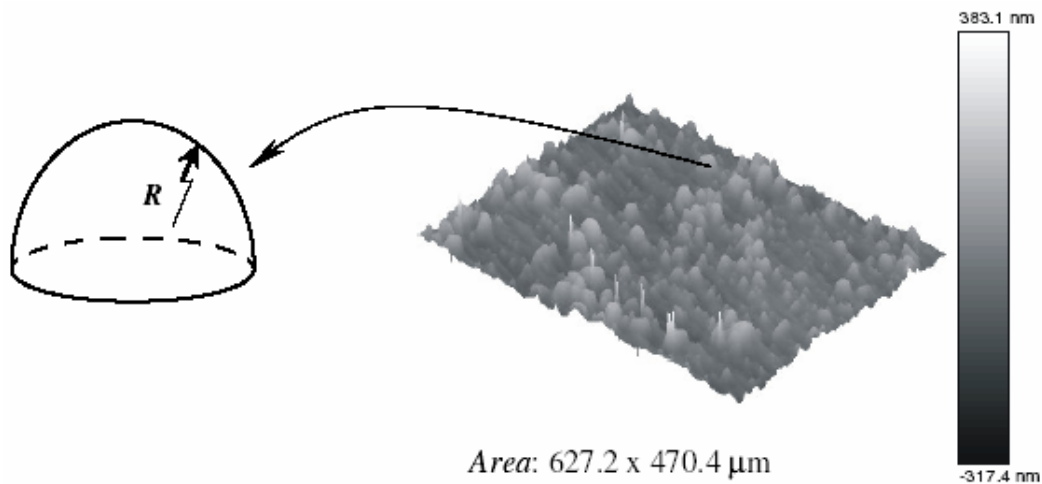
Gambar 1. 3 Pengaruh *running-in* pada profil permukaan, (Whitehouse, 1994).

Dalam sebagian besar kontak mekanik permukaan, koefisien gesek dan keausan yang menurun karena proses *running-in*. Deformasi plastis menyebabkan peningkatan area kontak dan sebagai hasilnya, penurunan tekanan kontak rata-rata atau daya dukung beban meningkat. Perlu dicatat bahwa jika terjadi deformasi plastis makroskopik, perubahan dari diameter *roller* di bantalan rol misalnya, akan ada kegagalan fungsi. Tetapi jika terjadi deformasi plastis mikroskopis, yaitu pada tingkat kekasaran, kinerja fungsi dari komponen-komponen mesin akan meningkat.

Tujuan dari tesis ini adalah memprediksi kekasaran permukaan setelah periode *running-in* dalam kontak *rolling* statis. Proses *running-in* adalah rumit, jumlah variabel yang terlibat sangat banyak. Tesis ini akan difokuskan hanya pada prediksi deformasi plastis mikro geometri dari kontak permukaan logam yang beroperasi dalam situasi dekat atau *rolling* murni.

Ketika dua permukaan benda padat saling menekan selalu akan terjadi deformasi kontak, berdasar peninjauan skala yang digunakan, deformasi kontak dapat dikategorikan sebagai *macro contact* atau *micro contact*. Kebanyakan permukaan benda padat adalah tajam pada skala mikro. Titik titik tertinggi

(*microprotrusions*), biasa disebut asperiti, ada pada semua permukaan padat, lihat Gambar 1.4.



Gambar 1. 4 Permukaan benda dan asperiti, (Jamari, 2006).

Pada permukaan yang tidak dilumasi, ketika permukaan tersebut saling menekan, kontak yang nyata terjadi pada asperiti. Jumlah asperiti pada area kontak semakin banyak seiring meningkatnya beban yang diberikan. Deformasi terjadi pada daerah kontak, dimana tegangan timbul akibat pembebanan. Tergantung beban yang ditahan oleh asperiti dan sifat mekanik bahan, asperiti akan terdeformasi elastis, elastis-plastis atau plastis (*fully plastic*). Tegangan lokal pada titik kontak jauh lebih tinggi dari pada tegangan nominal. Oleh karena itu deformasi plastis lokal pada umumnya ditemukan pada kontak permukaan yang tajam. Asperiti pada benda padat kadang-kadang dianggap sebagai bentuk bola pada puncaknya dengan ukuran berbeda beda sedemikian sehingga studi tentang kontak dua permukaan dapat disederhanakan sebagai deretan kontak bola yang terdeformasi pada ujungnya (Jamari, 2006).

1. 2 Originalitas Penelitian

Penelitian tentang deformasi plastis pada kontak statis antar hemisphere dengan variasi rasio radius hemisphere ini menggunakan analisis elemen hingga dan didukung dengan eksperimen. Belum ada literatur yang melakukan penelitian tentang perhitungan deformasi plastis asperiti dengan

variasi rasio radius, kecuali eksperimen yang dilakukan oleh Jamari (2006) dengan bahan baja yang dikeraskan. Sedangkan penelitian ini menggunakan bahan *brass*. Sehingga keaslian penelitian ini dapat dipertanggungjawabkan.

1.3 Pembatasan Masalah

Penelitian ini dilakukan dengan batasan-batasan sebagai berikut:

- Pemodelan elemen hingga menggunakan ABAQUS.
- Ukuran radius pemodelan kontak meliputi 7 variasi pasangan.
- Kondisi pemodelan kontak menggunakan $\mu = 0$ dan $\mu = 0,2$.
- Eksperimen dilakukan pada mesin uji tekan.
- Spesimen dibuat dari bahan *brass*.
- Ukuran spesimen eksperimen meliputi 7 variasi pasangan.
- Pembebanan yang diberikan 8000 N dan 11000 N.
- Kondisi kontak spesimen diberi pelumas dan tanpa pelumas

1.4 Tujuan Penelitian

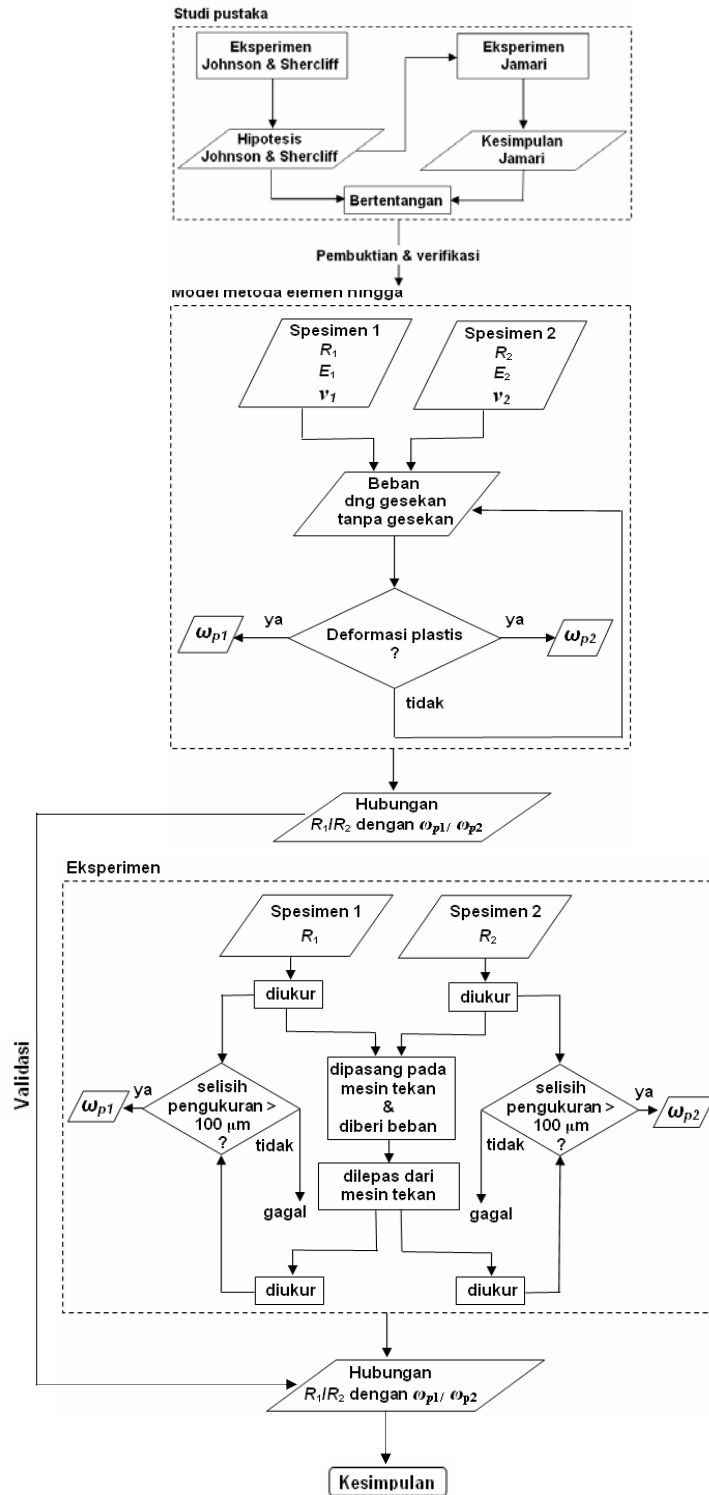
- Pembuktian hipotesis Johnson, K. L. dan Shercliff, H. R. (1992) yang menyatakan bahwa ketika terjadi kontak asperiti dua benda yang memiliki kekerasan sama, kedalaman deformasi plastis adalah sama untuk masing-masing benda, tidak terikat pada ukuran geometrinya.
- Melakukan verifikasi terhadap pernyataan Johnson, K. L. dan Shercliff, H. R. (1992) dan Jamari (2006) yang secara eksplisit berbeda.
- Dalam pembuktian ini akan dicari hubungan antara rasio radius spesimen dengan rasio deformasi yang terjadi pada masing-masing pasangan spesimen.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini merupakan dasar pemahaman mengenai *running-in* kaitannya dengan proses *running-in*, yang mana deformasi asperiti adalah salah satu mekanisme dalam proses *running-in*, deformasi asperiti disini hanya ditinjau dari kontak *rolling*. Seperti diketahui prinsip dasar kontak *rolling* adalah kontak statis (*stationary contact*) yang penulis bahas pada penelitian ini.

1.6 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang digunakan dalam tesis ini adalah sebagai berikut:



Gambar 1.5 Diagram alir metodologi penelitian.

1.7 Sistematika Tesis

Bab 1 Pendahuluan

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

Bab 2 Tinjauan pustaka

Berisi Pengenalan, *running-in* pada dua permukaan yang dapat terdeformasi, kontak permukaan bola, hipotesis Johnson, K. L. – Shercliff, H. R., eksperimen Jamari dan ringkasan.

Bab 3 Analisis elemen hingga

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

Bab 4 Eksperimen

Berisi 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

Berisi pembuktian hipotesis Johnson, K. L. dan Shercliff, H. R., verifikasi terhadap pernyataan Johnson, K. L. dan Shercliff, H. R. dengan pernyataan Jamari, dan hubungan antara rasio deformasi plastis dengan rasio radius spesimen, serta saran.

Bab 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengenalan

Kontak *rolling* dapat ditemukan dalam berbagai aplikasi seperti bantalan rol, roda gigi, ban, serta rel dan roda. Saat beban kontak melebihi batas *shakedown* plastis, siklus berkelanjutan (*continuous cyclic*) deformasi plastis terjadi dekat permukaan kontak. Siklus deformasi mempromosikan perubahan mikro dan menghasilkan kegagalan elemen rol dalam bentuk permulaan retak, pertumbuhan retak, dan fragmentasi. Jelas bahwa deformasi plastis dekat-permukaan berkontribusi pada keausan *sliding* dan permulaan retak kelelahan kontak (Bower, A. F., dan Johnson, K. L., 1991). Analisis tegangan adalah kunci untuk memahami dan memprediksi kelelahan dan perilaku keausan elemen bergulir (*rolling element*). Dua jenis metode analisis tegangan sering digunakan: metode semi-analitis dan metode elemen hingga. Pendekatan semi-analitis didasarkan pada solusi elastis. Metode tersebut sederhana namun dapat memberikan prediksi tegangan kontak *rolling* yang wajar. Karena kesederhanaannya, metode simulasi semi-analitis mampu untuk sejumlah besar siklus pembebanan kontak *rolling* (Jiang, Y., dan Sehitoglu, H., 1996). Sejumlah analisis elastis plastis tegangan kontak *rolling* dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga. Model mesh serupa dan pertimbangan kondisi batas umumnya digunakan dalam simulasi elemen hingga untuk kontak *rolling*. Namun, model plastisitas yang berbeda diterapkan. Perlu dicatat bahwa model material yang berbeda menghasilkan hasil yang berbeda secara drastis (Jiang, Y., Chang, J. dan Xu, B., 2001). Tegangan sisa yang diperoleh berdasarkan teori plastisitas yang berbeda juga berbeda secara signifikan. Pengamatan eksperimental telah menetapkan bahwa kontak *rolling* murni menghasilkan aliran “maju” dan gerakan permukaan progresif meluruh dengan meningkatnya jumlah guliran (*rolling passes*) (Hahn, G. T. dan Huang, Q., 1986).

2.2 *Running-in* pada Dua Permukaan yang Dapat Terdeformasi

Rowe, G. W. dkk. (1975) membuat dasar penyelidikan perubahan topografi permukaan selama *running-in* pada *plain bearing* yang dilumasi *grease*.

Terlihat bahwa kekasaran-awal permukaan suatu poros keras (*hard shaft*) adalah faktor yang menentukan, sedangkan topografi awal suatu batang lebih lunak (*softer member*) memiliki efek yang lebih kecil pada keseimbangan kekasaran *running-in*. Bila kekerasan sangat berbeda pada kontak dua permukaan, pemotongan dan pembajakan akan berlangsung dengan mudah dan memerlukan walaupun kecil harga kekasaran pada permukaan keras menjadi sekecil mungkin (So, H. dan Lin, R. C., 1999). Untuk mempelajari efek topografi permukaan pada *running-in*, kebanyakan dari literatur mempertimbangkan suatu permukaan yang relatif halus dan keras kontak dengan suatu permukaan kasar yang dapat terdeformasi. Hanya sedikit artikel membahas kontak antar dua permukaan kasar yang dapat terdeformasi pada *running-in*. sebagai contoh, Chou, C. C. dan Lin, F. J. (1997) menggunakan kekerasan yang sama pada *roll* dan piringan untuk mempelajari efek kekasaran dan *running-in* pada kontak garis yang dilumasi. Hasil menunjukkan bahwa *running-in* meningkatkan kekasaran pada *roll* yang halus, tetapi menurunkan kekasaran pada *running-in* yang kasar.

2.3 Kontak Permukaan Bola

Pembebanan dan tanpa pembebanan berulang pada permukaan kasar adalah masalah penting, khususnya dalam teknologi sistem mikro, seperti MEMS *micro switch* (Majumder, S. dkk, 2001, Majumder, S. dkk, 2003). Sebagai contoh interaksi *head-disk* pada sistem penyimpanan magnetik (Peng, W., dan Bhushan, B., 2003). Karenanya minat pada pembebanan dan atau tanpa pembebanan suatu bola dalam kontak dengan bidang rata, yang mana dapat mensimulasikan asperiti tunggal pada permukaan kasar, jelas nyata.

Johnson, K. L. (1985) menawarkan salah satu model analitis sederhana yang pertama pada kontak indentasi bentuk bola elastis plastis tanpa pembebanan dengan asumsi proses tanpa pembebanan menjadi elastis sempurna berdasar pada Tabor, D. (1948) pengamatan indentasi bentuk bola untuk pengukuran kekerasan.

Mesarovic, S. D. dan Johnson, K. L. (2000) yang diuji proses dekohesi dua bola elastis plastis mengikuti indentasi timbal balik diluar batas elastis. Itu diasumsikan bahwa selama tanpa pembebanan deformasi sebagian

besar elastis. Vu-Quoc, L. dkk (2000) memperkenalkan suatu model sederhana untuk hubungan beban normal-jarak untuk kontak partikel berbentuk bola, menghitung untuk efek deformasi plastis. Simulasi elemen hingga *nonlinear* dilaksanakan oleh Lin, Y. Y. dan Hui, C. Y. (2002), Yan, S. L. dan Li, L. Y. (2003), serta Ye, N. dan Komvopoulos, K. (2001) untuk studi efek bola dibebani dan bola tanpa beban. Li, L. Y. dkk, (2002) yang memperkenalkan suatu model teoritis untuk kontak tanpa gesekan bola *rigid* dengan suatu permukaan datar *elastic-perfectly plastic* atau suatu bola *elastic-perfectly plastic* dengan dinding *rigid*. Model ini dapat dipertimbangkan suatu modifikasi model Johnson, K. L. semasih didasarkan pada analisis elemen hingga dan mempertimbangkan variasi dalam kurva kontak permukaan selama interaksi kontak. Y. Kligerman dkk (2004), mengembangkan suatu model tanpa beban untuk kontak tanpa gesekan suatu pembebanan elastis plastis bola dengan bidang halus yang keras. Sejak suatu kontak berbentuk bola boleh disimulasikan sebagai asperiti tunggal pada permukaan kasar, analisis ini dapat membantu memahami perilaku permukaan kasar selama pembebanan berulang dan tanpa pembebanan berulang. Pemodelan ini menghasilkan ungkapan tanpa dimensi empiris untuk beban kontak tanpa dimensi, dan sisa jarak selama tanpa pembebanan suatu kontak berbentuk bola memuat elastis plastis diperoleh untuk suatu cakupan luas tingkat pembebanan dalam kaitan dengan interferensi kontak maksimum. Ekspresi ini didasarkan pada hasil numerik/kwantitatif *fitting* diperoleh dari analisis elemen hingga untuk berbagai material dan geometri bola yang dibebani. Model tanpa dimensi diperoleh menjadi umum alami dan tidak tergantung radius bola atau material khusus. Kesimpulan utama analisis ini adalah bahwa kontak berbentuk bola tanpa pembebanan setelah pembebanan elastis plastis adalah peristiwa tidak elastis dan tidak linier.

2. 4 Hipotesis Johnson, K. L. – Shercliff, H. R.

Johnson, K. L.-Shercliff, H. R. (1992) melakukan penelitian dengan pendekatan interaksi antar asperiti pada keadaan kondisi stabil menggunakan teori *shektdown* dalam teori plastisitas. Teori Melan (1938) untuk material elastis-plastis sempurna (*elastic-perfectly plastic material*), dan perluasannya ke material

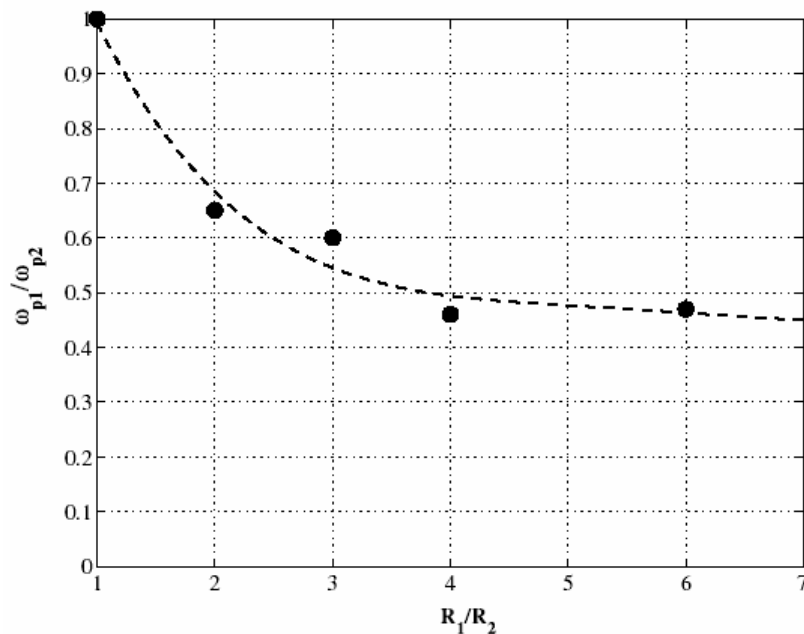
yang memperlihatkan *kinematic hardening* oleh Ponter, A. R. S. (1976). Dipandu oleh teori di atas, Johnson, K. L. membuat hipotesis asperiti yang saling berinteraksi, setelah terjadi deformasi plastis pada permulaan kontak, berkembang profil dalam kondisi stabil seperti pada keadaan *shakedown* atau dibawah keadaan *shakedown*. Dengan cara ini profil keadaan mantap dan variasi berulang (*cyclic variation*) dalam beban kontak dan tegangan dapat diperoleh. Pendekatan ini telah diaplikasikan untuk kontak *rolling* dan *sliding* pada bentuk bola di atas permukaan datar oleh Kapoor, A. dan Johnson, K. L. (1992). Permasalahan interaksi asperiti dikaitkan secara detail dengan efek perubahan profil asperiti dalam mencapai *shakedown*. Faktor ini tidak tercakup oleh teori yang ada. Oleh karena itu digunakan dasar analisis pada hipotesis bahwa “profil asperiti terdeformasi secara plastis sedemikian sehingga dalam keadaan stabil (*steady state*) dibebani ke batas *shakedown* dalam seluruh periode kontak, jika batas *shakedown* terlewati di beberapa titik selama periode kontak, kemudian profil deformasi plastis lebih lanjut akan terbentuk untuk mengurangi tegangan kontak”. Bagaimanapun, disana nampak seperti tidak ada jaminan bahwa disana tidak mungkin terjadi selama periode kontak ketika tekanan kontak jatuh dibawah tekanan *shakedown*. Tekanan rata-rata ditumpu oleh pasangan asperiti selama kontak berulang (*contact cycle*).

Eksperimen dirancang untuk menyelidiki hipotesis di atas dengan asumsi: (i) Profil stabil adalah yang mempertahankan tegangan kontak pada batas *shakedown* (ii). Batas *shakedown* mengambil nilai yang tetap yang sesuai untuk *sliding* pada permukaan datar (iii). Dengan radius asperiti yang berbeda, pengurangan ketinggian adalah sama untuk kedua-duanya. Dalam eksperimen dilakukan menggunakan tiga situasi yang berbeda: (i) Radius dan material kedua spesimen sama (ii) Radius yang berbeda dengan material yang sama (iii) Radius dan material yang berbeda.

Hasil analitis dan eksperimen Johnson, K. L. berdasar hipotesis di atas dengan asumsi (iii) dan situasi eksperimen (ii) dapat dikatakan: “ketika terjadi kontak asperiti dua benda yang memiliki kekerasan sama, kedalaman deformasi plastis adalah sama untuk masing-masing benda, tidak terikat pada ukuran geometrinya”

2.5 Eksperimen Jamari

Dari hipotesis Johnson, K. L. dan Shercliff, H. R., (1992) yang menyatakan bahwa “ketika terjadi kontak asperiti dua benda yang memiliki kekerasan sama, kedalaman deformasi plastis adalah sama untuk masing-masing benda, tidak terikat pada ukuran geometrinya”. Berdasarkan hipotesis ini, Jamari (2006) melakukan eksperimen pada kontak antara dua bola baja keras ($H = 8,3$ GPa, $E = 210$ GPa dan $\nu = 0,3$). Sejumlah pasangan kontak dengan rasio radius yang berbeda telah dipilih, dan hasilnya disajikan pada Gambar. 2. 1. Jelas, teramati bahkan pada benda yang memiliki kekerasan yang sama, tingkat deformasi plastis benda kontak berbeda secara signifikan, yang bertentangan dengan hipotesis Johnson, K. L. dan Shercliff, H. R.,. Rasio deformasi plastis (ω_{p1}/ω_{p2}) mengecil dengan kenaikan rasio radius (R_1/R_2) benda. Benda dengan radius lebih besar terdeformasi plastis lebih sedikit daripada benda dengan radius lebih kecil.



Gambar 2. 1 Rasio deformasi plastis sebagai fungsi dari rasio radius benda kontak, hasil eksperimental dan kurva *fitting* (garis putus-putus), (Jamari, 2006).

2.6 Ringkasan

Studi *running-in* telah dilakukan selama bertahun-tahun, namun, karena kompleksitas fenomena banyak masalah belum diselesaikan. Hal-hal berikut telah diamati dari tinjauan pustaka:

- Kontak *rolling* salah satu solusi yang digunakan untuk mengendalikan gesekan dan keausan kaitannya dengan pembebanan antar permukaan pada dua permukaan yang dipisahkan oleh suatu bentuk *roll*.
- Dalam teknologi sistem mikro, pembebanan dan atau tanpa pembebanan suatu bola dalam kontak dengan bidang rata, yang mana dapat mensimulasikan asperiti tunggal pada permukaan kasar.
- Johnson, K. L.-Shercliff, H. R. (1992) menyatakan “ketika terjadi kontak asperiti dua benda yang memiliki kekerasan sama, kedalaman deformasi plastis adalah sama untuk masing-masing benda, tidak terikat pada ukuran geometrinya”
- Jamari (2006) melakukan eksperimen yang hasilnya bertentangan dengan hipotesis Johnson, K. L. dan Shercliff, H. R. Rasio deformasi plastis (ω_{p1}/ω_{p2}) mengecil dengan kenaikan rasio radius (R_1/R_2) benda. Benda dengan radius lebih besar terdeformasi plastis lebih sedikit daripada benda dengan radius lebih kecil.

Menanggapi penelitian yang telah dilakukan berkaitan dengan kontak rolling dan dari sudut pandang teknologi sistem mikro yang menggunakan pemodelan bentuk bola sebagai asumsi suatu bentuk ujung asperiti yang telah dilakukan oleh Johnson, K. L. dan Shercliff, H. R. kemudian dilanjutkan oleh Jamari diperoleh hasil yang berbeda.

Oleh karena itu dalam penelitian ini perlu membuktikan pernyataan Johnson, K. L. dan Shercliff, H. R. serta memverifikasi pernyataan tersebut dengan pernyataan Jamari.

Bab 3 PEMODELAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

3.1 Pengertian Metoda Elemen Hingga

Finite element method (FEM), atau metode elemen hingga adalah suatu metode analisis numerik yang didasarkan pada gagasan dalam membangun suatu obyek yang sangat rumit menjadi beberapa bagian/ elemen yang sederhana.

Untuk masalah yang melibatkan geometri rumit, pembebanan, dan sifat material, biasanya tidak mungkin untuk mendapatkan solusi matematis analitis. Analitis adalah solusi yang diberikan oleh suatu ekspresi matematika yang menghasilkan nilai-nilai yang tidak diketahui yang diinginkan di setiap lokasi di suatu obyek (disini total elemen atau sistem bagian fisik) dan karena itu berlaku untuk jumlah tak terbatas lokasi titik di obyek. Solusi analitis ini umumnya memerlukan solusi persamaan diferensial biasa atau parsial, yang karena geometri yang rumit, biasanya tidak dapat diperoleh. Oleh karena itu, kita perlu mengandalkan metode numerik, seperti metode elemen hingga, untuk solusi yang dapat diterima. Metode-metode numerik menghasilkan nilai perkiraan yang tidak diketahui pada titik diskrit dalam kontinum. Oleh karena itu, proses pemodelan obyek dengan membaginya menjadi suatu sistem yang setara dengan obyek yang lebih kecil atau unit (elemen hingga), interkoneksi pada titik-titik umum untuk dua atau lebih elemen (titik nodal atau *node*) disebut diskritisasi. Dalam metode elemen hingga, bukannya memecahkan masalah bagi seluruh obyek dalam satu operasi, tetapi merumuskan satu persamaan untuk setiap elemen hingga dan menggabungkan mereka untuk mendapatkan solusi dari seluruh elemen (Logan, D. L., 1992).

Secara singkat, solusi untuk masalah struktural biasanya mengacu untuk menentukan perpindahan di setiap node dan tegangan dalam setiap elemen yang membentuk struktur yang mengalami pembebanan.

3.2 Langkah-langkah Umum Metode Elemen Hingga

Biasanya, untuk masalah analisis tegangan struktural, analisis berusaha untuk menentukan perpindahan dan tegangan sepanjang struktur, yang berada dalam kesetimbangan kaitannya dengan pembebanan. Untuk struktur banyak, sulit untuk menentukan distribusi deformasi dengan menggunakan metode konvensional, dan dengan demikian metode elemen hingga harus digunakan.

Ini adalah dua pendekatan umum yang terkait dengan metode elemen hingga. Pendekatan satu, yang disebut gaya, atau metode fleksibilitas (*flexibility method*), menggunakan kekuatan internal sebagai masalah yang tidak diketahui. Untuk memperoleh persamaan, yang pertama persamaan kesetimbangan digunakan, kemudian persamaan tambahan diperlukan ditemukan dengan memperkenalkan persamaan kontinuitas atau kompatibilitas. Hasilnya adalah seperangkat persamaan aljabar untuk menentukan kekuatan berlebihan atau kekuatan tidak diketahui. Pendekatan kedua, yang disebut perpindahan atau metode kekakuan (*stiffness method*), menganggap perpindahan node sebagai masalah yang tidak diketahui. Misalnya, kondisi kompatibilitas mengharuskan elemen terhubung pada node, sepanjang tepi, atau di permukaan umum sebelum pembebanan tetap terhubung pada node, tepi, atau permukaan setelah terjadi deformasi pada awalnya mencukupi. Kemudian persamaan disajikan dalam istilah perpindahan node menggunakan persamaan kesetimbangan dan kekuatan hukum yang berlaku yang berkaitan dengan perpindahan. Kedua pendekatan menghasilkan yang tidak diketahui berbeda (gaya atau perpindahan) dalam analisis dan matrik perbedaan terkait dengan formulasi di atas (fleksibilitas atau kekakuan). Untuk tujuan komputasi, metode perpindahan (atau kekakuan) yang lebih diinginkan, karena perumusannya paling sederhana pada masalah analisis struktural. Selain itu, sebagian besar untuk tujuan umum program elemen hingga telah memasukkan perumusan perpindahan untuk memecahkan masalah struktural.

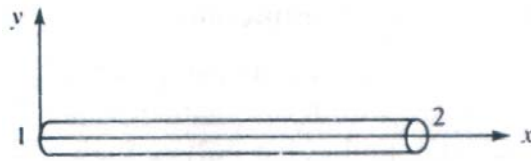
Metode elemen hingga melibatkan pemodelan struktur dengan menggunakan elemen-elemen kecil yang saling berhubungan yang disebut elemen hingga. Sebuah fungsi perpindahan adalah yang terkait dengan setiap elemen hingga. Setiap elemen saling terkait, langsung atau tidak langsung, untuk setiap

elemen lain melalui umum (atau bersama) antarmuka, termasuk node dan atau garis batas dan atau permukaan. Pada penggunaan sifat tegangan atau regangan yang diketahui dari material yang membentuk struktur, seseorang dapat menentukan perilaku dari node yang diberikan dalam istilah sifat dari setiap elemen lainnya dalam struktur. Total set persamaan yang menggambarkan perilaku dari setiap hasil node dalam serangkaian persamaan aljabar terbaik dinyatakan dalam notasi matriks.

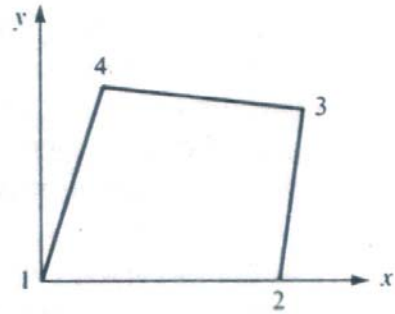
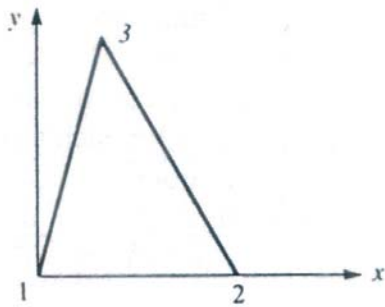
Perlu diketahui bahwa analisis harus membuat keputusan tentang membagi struktur atau kontinum menjadi elemen hingga dan memilih jenis elemen untuk digunakan dalam analisis (langkah 1) dan jenis pembebanan yang akan diterapkan dan jenis kondisi batas untuk diterapkan. Langkah-langkah lain, 2, 3, 4, 5, 6, dan 7, dilakukan secara otomatis oleh program komputer.

3. 2. 1 Langkah 1 Diskritisasi dan Memilih Tipe Elemen

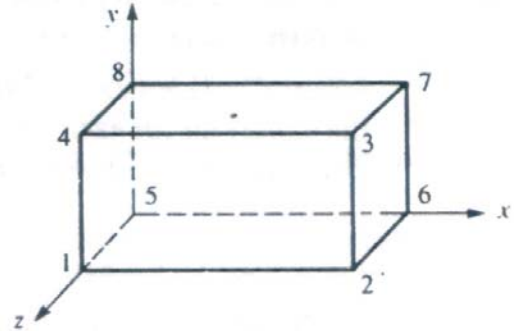
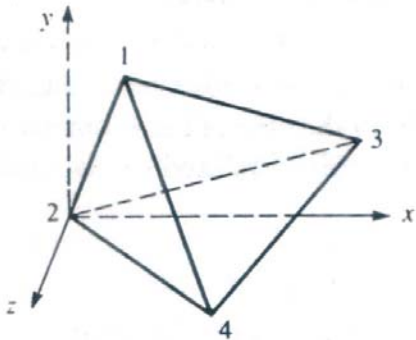
Langkah 1 melibatkan membagi obyek menjadikan sistem setara dengan elemen hingga dengan node yang terkait dan memilih jenis elemen yang paling sesuai. Jumlah elemen yang digunakan dan variasi ukuran dan jenis tertentu dalam obyek terutama masalah kebenaran teknik. Elemen harus dibuat cukup kecil untuk memberikan hasil yang dapat digunakan. Obyek terdiskritisasi atau mesh sering dibuat dengan program jaring-generasi atau program preprocessor tersedia bagi pengguna. Pemilihan elemen yang digunakan dalam analisis elemen hingga tergantung pada susunan fisik dari obyek dibawah kondisi pembebanan aktual dan seberapa dekat dengan perilaku aktual analisis menginginkan hasil. Hukum tentang kesesuaian satu, dua, atau tiga-dimensi idealisasi diperlukan. Selain itu, pilihan dari elemen yang paling tepat untuk masalah tertentu adalah salah satu tugas utama yang harus dilakukan oleh desainer atau analisis. Elemen yang umum digunakan dalam praktek sebagian besar yang dipertimbangkan seperti terlihat pada Gambar 3. 1.



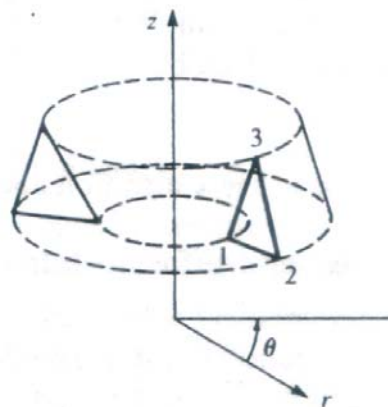
a) Elemen garis sederhana biasanya digunakan untuk mewakili sebuah *bar* atau elemen balok



b) Elemen dua dimensi sederhana biasanya digunakan untuk mewakili tegangan-regangan bidang



c) Elemen tiga-dimensi yang sederhana biasanya digunakan untuk mewakili stres tiga dimensi



d) elemen *axisymmetric* sederhana biasanya digunakan untuk mewakili masalah *axisymmetric*

Gambar 3. 1 Berbagai jenis elemen hingga (Logan, D. L., 1992).

Utamanya elemen garis, Gambar 3. 1(a), terdiri dari *bar* atau *truss* dan disimbolkan sebagai segmen garis. Hal tersebut sering digunakan untuk model *truss* dan struktur. Elemen garis sederhana (disebut elemen linear) memiliki dua node, satu di setiap ujung, meskipun elemen tingkat tinggi yang memiliki tiga atau lebih (elemen *quadratic*, *cubic*) juga ada.

Dasar elemen dua dimensi (atau elemen bidang), Gambar 3. 1(b), dibebani oleh gaya dalam bidangnya sendiri (kondisi tegangan bidang atau regangan bidang). Elemen tersebut adalah elemen segitiga atau segiempat. Elemen dua dimensi sederhana hanya memiliki node pada sudut (elemen linier) dengan sisi-sisi lurus atau batas, meskipun ada juga elemen order yang lebih tinggi, biasanya dengan node *midside* (disebut elemen kuadrat) dan sisi melengkung. Elemen-elemen dapat memiliki variabel ketebalan seluruh atau konstan. Mereka sering digunakan untuk model berbagai masalah rekayasa.

Elemen tiga dimensi yang paling umum, Gambar 3. 1(c), adalah elemen *tetrahedral* dan *hexahedral* (atau bata); mereka digunakan ketika kita perlu untuk melakukan analisis tegangan tiga dimensi. Dasar elemen tiga dimensi memiliki node hanya sisi sudut dan lurus, sedangkan elemen tingkat tinggi dengan node *midedge* (dan mungkin *midface nodes*) memiliki permukaan melengkung untuk sisinya.

Elemen *axisymmetric*, Gambar 3. 1(d), dikembangkan dengan memutar sebuah segitiga atau segiempat sumbu tetap terletak di bidang elemen melalui 360° . Elemen dapat digunakan ketika masalah geometri dan pembebanan adalah *axisymmetric*.

3. 2. 2 Langkah 2 Memilih Fungsi Perpindahan

Langkah 2 melibatkan memilih fungsi perpindahan dalam setiap elemen. Fungsi didefinisikan dalam elemen dengan menggunakan nilai node elemen. Linear, kuadrat, polinomial kubik fungsi yang sering digunakan, karena sangat sederhana untuk bekerja dengan formulasi elemen hingga. Namun, seri trigonometri juga bisa digunakan. Untuk elemen dua dimensi, fungsi perpindahan merupakan fungsi dari koordinat di bidang tersebut (misalnya, bidang xy). Fungsi disajikan dalam posisi node yang tidak diketahui (dalam masalah dua-dimensi,

komponen x dan komponen y). Fungsi perpindahan umum yang sama dapat digunakan berulang kali untuk setiap elemen. Oleh karena itu, metode elemen hingga adalah satu di mana kuantitas terus menerus, seperti perpindahan seluruh struktur, yang didekati dengan model diskrit yang terdiri dari satu set fungsi sesepenggal-menerus (*piecewise-continuous*) didefinisikan dalam setiap domain hingga atau elemen hingga.

3. 2. 3 Langkah 3 Menentukan Regangan/Perpindahan dan Tegangan-Regangan

Regangan/perpindahan dan hubungan tegangan-regangan yang diperlukan untuk menurunkan persamaan pada setiap elemen hingga. Dalam kasus deformasi satu dimensi, mengatakan, dalam arah x , kita memiliki regangan ε_x terkait dengan perpindahan u dengan

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (3. 1)$$

Untuk regangan kecil. Selain itu, tegangan harus berhubungan dengan regangan melalui hukum tegangan-regangan umumnya disebut hukum konstitutif. Kemampuan untuk menentukan perilaku material akurat yang paling penting dalam memperoleh hasil yang dapat diterima. Hukum paling sederhana tegangan-regangan, hukum Hooke, sering digunakan dalam analisis tegangan, diberikan oleh

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \quad (3. 2)$$

dimana σ_x = tegangan pada arah x dan E = modulus elastisitas.

3. 2. 4 Langkah 4 Menurunkan Matrik Kekakuan Elemen dan Persamaan

Awalnya, pengembangan matrik elemen kekakuan dan persamaan elemen didasarkan pada konsep pengaruh koefisien kekakuan (*stiffness*), yang mensyaratkan latar belakang dalam analisis struktural. Salah satu metode adalah

metode kesetimbangan langsung. Menurut metode ini, matrik kekakuan dan persamaan elemen yang berkaitan pembebanan noda untuk perpindahan noda diperoleh dengan kondisi kesetimbangan gaya untuk elemen dasar, bersama dengan hubungan gaya atau deformasi. Karena metode ini paling mudah beradaptasi dengan garis atau bidang (elemen satu atau dua dimensi).

Dengan menggunakan metode di atas akan menghasilkan persamaan untuk menggambarkan perilaku suatu elemen. Persamaan ini ditulis dengan mudah dalam bentuk matrik sebagai

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \cdots & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \cdots & k_{3n} \\ \vdots & & & & \vdots \\ k_{n1} & & & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

Atau dalam bentuk matrik kompak sebagai

$$\{f\} = [K]\{d\} \quad (3.4)$$

Dimana $\{f\}$ adalah vektor gaya noda elemen, $[k]$ adalah matrik kekakuan elemen, dan $\{d\}$ adalah vektor dari elemen yang tidak diketahui derajat kebebasan noda (perpindahan umum). Disini perpindahan umum dapat mencakup jumlah seperti perpindahan aktual, lereng, atau lekukan.

3.2.5 Langkah 5 Merakit Persamaan Elemen untuk Mendapatkan Persamaan Global atau Total dan Memperkenalkan Kondisi Batas

Persamaan elemen individu yang dihasilkan pada langkah 4 sekarang dapat ditambahkan bersama-sama menggunakan metode superposisi (disebut metode kekakuan langsung) yang berdasar kesetimbangan gaya noda, agar memperoleh persamaan global untuk seluruh struktur. Tersirat dalam metode kekakuan langsung adalah konsep kontinuitas, atau kompatibilitas, yang mengharuskan struktur tetap bersama dan tidak ada kesulitan/kemacetan terjadi di mana saja dalam struktur.

Rakitan akhir atau persamaan global ditulis dalam bentuk matrik adalah

$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (3.5)$$

Dimana $\{F\}$ adalah vektor gaya noda global, $[K]$ adalah struktur global atau total matrik kekakuan, dan $\{d\}$ sekarang vektor struktur dikenal dan tidak dikenal derajat kebebasan noda atau perpindahan umum. Hal ini dapat menunjukkan bahwa, pada tahap ini, matrik kekakuan global $[K]$ adalah matrik tunggal karena determinannya sama dengan nol. Untuk menghapus singularitas masalah ini kita harus memanggil kondisi batas tertentu (atau kendala atau mendukung) sehingga struktur tetap ditempat bukan bergerak sebagai benda tegar. Pada saat ini cukup untuk dicatat bahwa batas invoking atau dukungan dalam kondisi hasil modifikasi dari persamaan global (3. 5). Kami juga menekankan bahwa beban dikenal diterapkan telah dicatat dalam matrik gaya global $\{F\}$.

3. 2. 6 Langkah 6 Penyelesaian untuk Derajat Kebebasan yang Tidak Diketahui (atau perpindahan umum)

Persamaan (3. 5), dimodifikasi untuk memperhitungkan kondisi batas, adalah serangkaian persamaan aljabar simultan yang dapat ditulis dalam bentuk matrik yang diperluas sebagai:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

Sekarang n adalah jumlah total struktur derajat kebebasan noda yang tidak diketahui. Persamaan ini dapat diselesaikan untuk d 's dengan menggunakan metode eliminasi (seperti metode Gauss) atau metode iteratif (seperti metode Gauss-Seidel's). d 's disebut primer tidak diketahui karena jumlah pertama ditentukan dengan menggunakan kekakuan (atau perpindahan) metode elemen hingga.

3. 2. 7 Langkah 7 Penyelesaian untuk Regangan dan Tegangan Elemen

Untuk masalah analisis tegangan struktural, jumlah sekunder yang penting regangan dan tegangan (atau momen dan gaya geser) dapat diperoleh karena mereka dapat secara langsung dinyatakan dalam istilah perpindahan ditentukan pada langkah 6. Hubungan khas antara regangan dan perpindahan dan antara tegangan dan regangan seperti persamaan (3. 1) dan (3. 2) untuk tegangan satu-dimensi yang diberikan pada langkah 3 dapat digunakan.

3. 2. 8 Langkah 8 Menginterpretasikan Hasil

Tujuan akhirnya adalah untuk menafsirkan dan menganalisis hasil untuk digunakan dalam desain/proses analisis. Penentuan lokasi di struktur dimana deformasi yang besar dan tegangan besar terjadi umumnya penting dalam pembuatan keputusan oleh pendesain/analisis. Program komputer *Postprocessor* membantu pengguna untuk menginterpretasikan hasil dengan menampilkan dalam bentuk grafik.

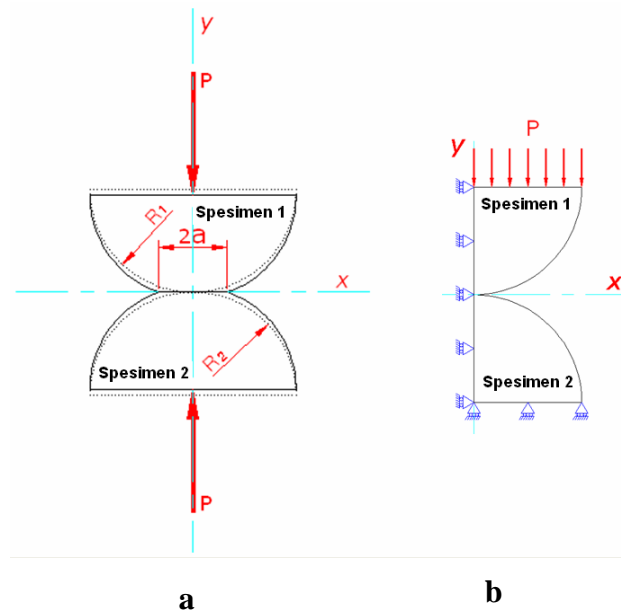
3. 3 Pengaplikasian Metoda Elemen Hingga

Pada pengaplikasian metode elemen hingga dengan menggunakan software ABAQUS 6.5/CAE, agar efektif dan efisien dalam pelaksanaannya, maka penulis tidak mengacu pada urutan langkah-langkah yang dipaparkan pada langkah-langkah umum metode elemen hingga, tetapi mengikuti prosedur sesuai aturan yang ada dalam software.

3. 3. 1 Spesifikasi Masalah

Analisis elemen hingga dalam tesis ini menggunakan ABAQUS 6.5/CAE pemodelan terdiri dari 7 simulasi, masing-masing simulasi mewakili kontak dua bentuk model setengah bola seperti Gambar 3. 2a, dimana masing-masing pasangan kontak tersebut memiliki perbandingan ukuran (R_1/R_2) berturut-turut 1, 2, 3, 4, 5, 6, dan 7. Dalam aplikasi pada pemodelan elemen hingga digunakan bentuk seperempat lingkaran seperti Gambar 3. 2b, hal tersebut dipilih agar lebih efisien dalam pelaksanaannya. *Modulus elastisitas material* ($E_1 = E_2 = 96$ GPa), *yield strength* ($Y = 310$ MPa), *koefisien Friction* ($\mu = 0.1$, dan 0.2) dan

Possion's ratio ($\nu_1 = \nu_2 = 0.34$). Beban yang digunakan 8000 N dan 11000 N perbedaan beban tersebut dilakukan agar diperoleh hasil mengenai pengaruh besarnya beban yang diberikan terhadap deformasi plastis pada masing-masing pasangan kontak. Pada simulasi dengan beban 8000 N dilakukan menggunakan dua kondisi yakni kondisi dengan gesekan dan kondisi tanpa gesekan, perbedaan kondisi tersebut dilakukan agar diperoleh hasil mengenai pengaruh pelumasan yang diberikan terhadap deformasi plastis pada masing-masing pasangan kontak.



Gambar 3. 2 (a) Geometri pemodelan kontak dua spesimen (b) Geometri pemodelan simulasi.

3. 3. 2 Prosedur Pemodelan Metoda Elemen Hingga

Prosedur pemodelan metoda elemen hingga pada dasarnya meliputi tiga langkah yang harus dilalui yakni, langkah 1 *preprocessing*, langkah 2 *solution* dan langkah 3. *postprocessing*. Pemaparan langkah-langkah tersebut secara rinci sebagai berikut:

Langkah 1 *Preprocessing*

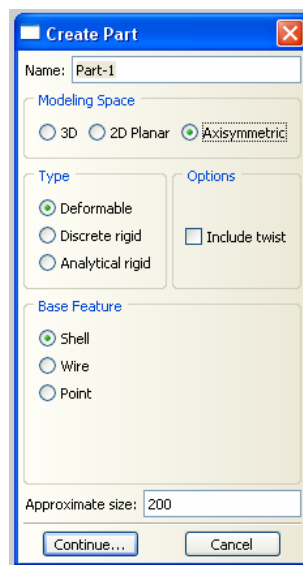
Langkah ini meliputi pembuatan *part*, memilih *property* dan *assembly*.

A. Pembuatan *part*

Pada pemodelan ini terdiri dari dua *part* yang saling kontak, seperti pada Gambar 3. 2 b.

A. 1 Pembuatan *part 1*

- Pada *context bar* > *Module* > *Part*
- Pada *toolbox area* > *Create part*, muncul gambar *dialog box* seperti di bawah



Gambar 3. 3 *Create part dialog box.*

- Pada *dialog box*:
 - *modeling space* > *Axisymmetric*
 - *Type* > *deformable*
 - *Base feature* > *shell* *Approximate*
 - *Approximate size* isi 200.
 - *Continue*
- Pada *toolbox area* > *Create Lines: Connected*
- Memasukkan koordinat sesuai dengan ukuran pemodelan

Tabel 3. 1 Lokasi *keypoints number* untuk *part 1*.

<i>Keypoints Number</i>	Lokasi titik pada sistem koordinat		
	X	Y	Z
1	0	0	0
2	0	17,5	0
3	17,5	17,5	0

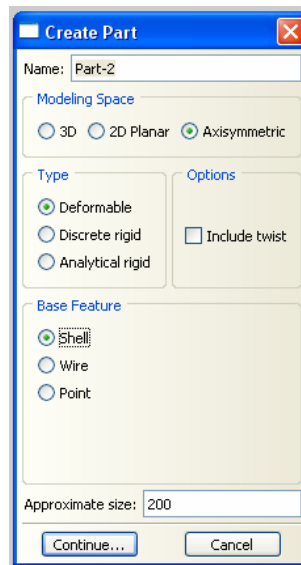
- Membuat busur melalui line pada system koordinat, pada *toolbox area* > *Create Arc: center and 2 endpoint*, hubungkan line tersebut dengan line lainnya, tekan Esc > *done*



Gambar 3. 4 Geometri part 1.

A. 2 Pembuatan part 2

- Pada *context bar* > *Module* > *Part*
- Pada *toolbox area* > *Create part*, muncul gambar *dialog box* seperti di bawah



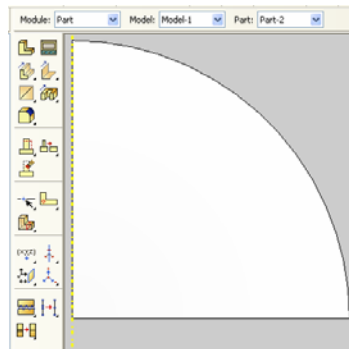
Gambar 3. 5 Create part dialog box.

- Pada *dialog box*:
 - *modeling space* > *Axisymmetric*
 - *Type* > *deformable*
 - *Base feature* > *Shell approximate*
 - *Approximate size* isi 200.
 - *Continue*
- Pada *toolbox area* > *Create Lines: Connected*
- Memasukkan koordinat sesuai dengan ukuran pemodelan

Tabel 3. 2 Lokasi *keypoints number* untuk *part 2*.

<i>Keypoints number</i>	Lokasi titik pada sistem koordinat		
	X	Y	Z
1	0	0	0
2	0	-17,5	0
3	17,5	-17,5	0

- Membuat busur melalui line pada system koordinat, pada *toolbox area* > *Create Arc: center and 2 endpoint*, hubungkan *line* tersebut dengan *line* lainnya, tekan *Esc* > *done*

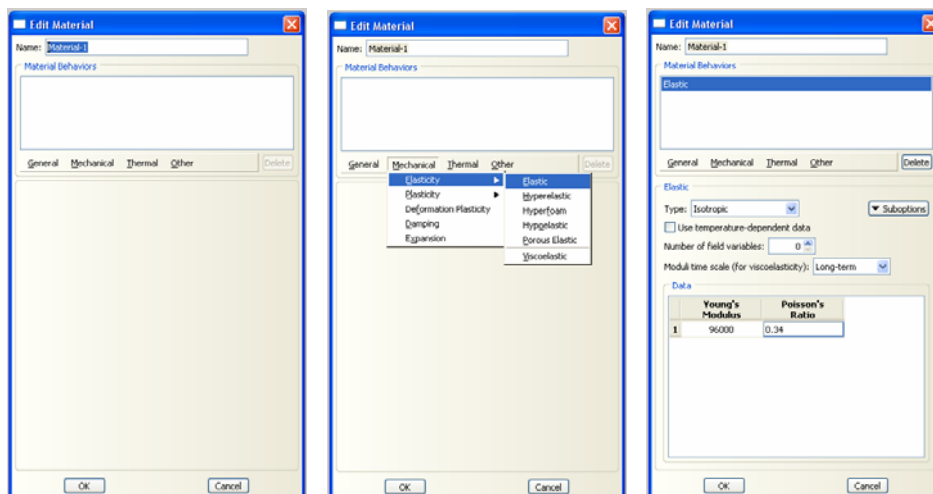


Gambar 3. 6 Geometri *part 2*.

B. Memilih *property*

Material yang digunakan dalam pemodelan ini adalah *elastic-perfectly plastic*. Menentukan sifat material elastis:

- Pada *context bar* > *Module* > *Property*
 - Pada *toolbox area* > *Create material*, muncul gambar *dialog box* seperti di bawah

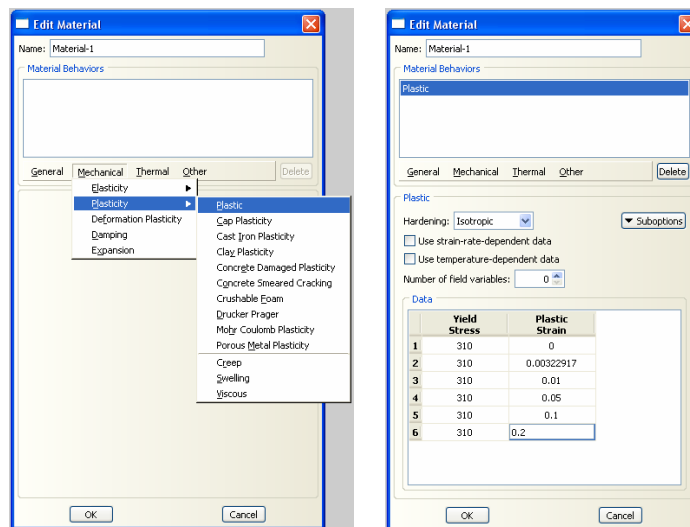


Gambar 3. 7 *Edit material dialog box*.

- Pada *dialog box*:
 - *Mechanical > Elasticity > Elastic*
 - *Elastic Type > Isotropic*
 - *Data > Young's modulus* isi 96000, *Poisson's ratio* isi 0,34
 - Ok.

Menentukan sifat material plastis:

- Pada *context bar > Module > Property*
- Pada *toolbox area > Create Material*, muncul gambar *dialog box* seperti di bawah

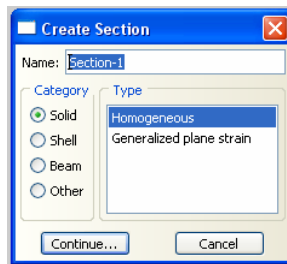


Gambar 3. 8 Edit material dialog box.

- Pada *dialog box*:
 - *Mechanical > Elasticity > Plastic*
 - *Plastic hardening > Isotropic*
 - *Data > isi sbb*:
 1. *Yield stress 310 Mpa, plastic strain 0*
 2. *Yield stress 310 Mpa, plastic strain 0,00322917*
 3. *Yield stress 310 Mpa, plastic strain 0,01*
 4. *Yield stress 310 Mpa, plastic strain 0,05*
 5. *Yield stress 310 Mpa, plastic strain 0,1*
 6. *Yield stress 310 Mpa, plastic strain 0,2*
 - Ok.

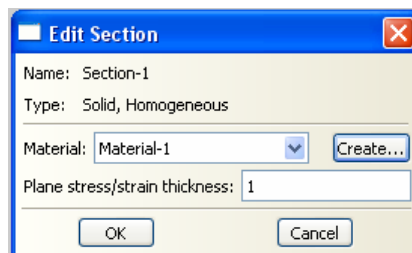
Selanjutnya masukkan sifat material tersebut kedalam pemodelan yang telah dibuat. Berikut ini adalah cara memasukkan sifat material kedalam pemodelan:

- Pada *context bar* > *Module* > *Property*
- Pada *toolbox area* > *Create Section*, muncul gambar *dialog box* seperti di bawah



Gambar 3. 9 *Create section dialog box.*

- Pada *dialog box*:
 - *Category* > *Solid*
 - *Type* > *Homogeneous*
 - *Continue*, muncul gambar *dialog box* seperti gambar di bawah

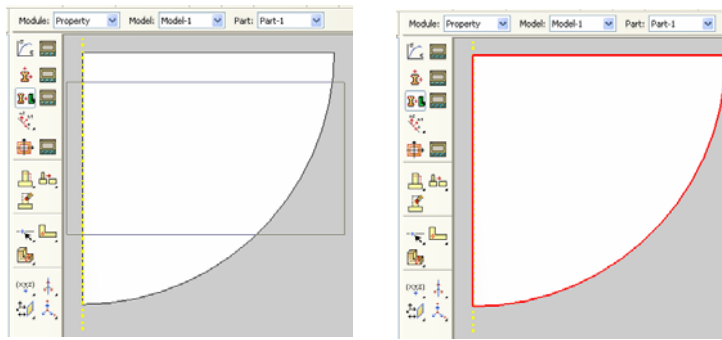


Gambar 3. 10 *Edit section dialog box.*

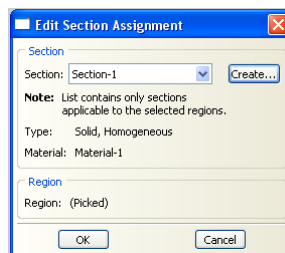
- Lanjutkan dengan klik *Ok*

Langkah selanjutnya adalah memasukkan *section* tersebut kedalam pemodelan pada *part 1*.

- Pada *context bar* > *Module* > *Property*
- Pada *toolbox area* > *Assign Section*, blok pada gambar *part 1* seperti di bawah

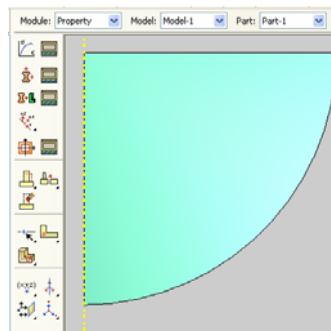


- Pada *prompt area* > *done*, muncul gambar *dialog box* seperti di bawah



Gambar 3. 11 Edit section assignment dialog box part 1.

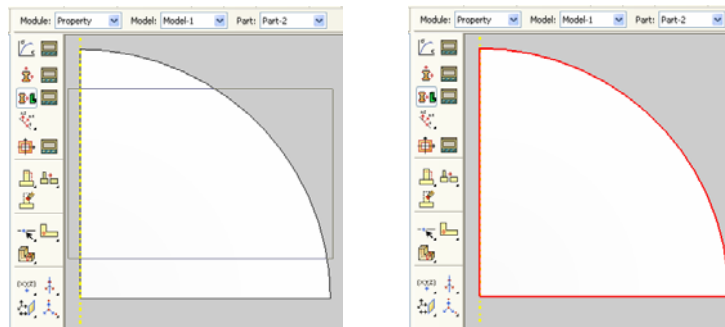
- Pada *edit section Assignment* > *Ok*, tampilan *viewport* menjadi seperti gambar di bawah



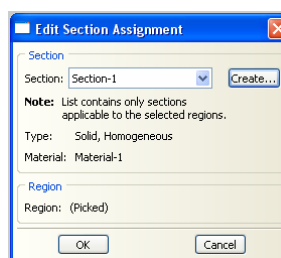
Gambar 3. 12 Part 1 setelah diberi sifat material.

Langkah selanjutnya adalah memasukkan *section* tersebut kedalam pemodelan pada *part 2*.

- Pada *context bar* > *Module* > *Property*
- Pada *toolbox area* > *Assign Section*, blok pada gambar *part 2* seperti di bawah

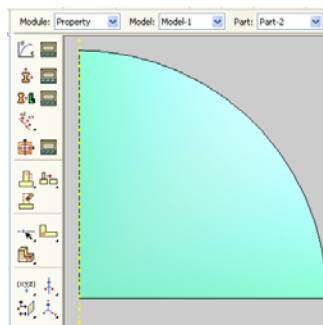


- Pada *prompt area* > *done*, muncul gambar *dialog box* seperti di bawah



Gambar 3. 13 Edit section assignment dialog box part 2.

- Pada *edit section Assignment* > *Ok*, tampilan *viewport* menjadi seperti gambar di bawah

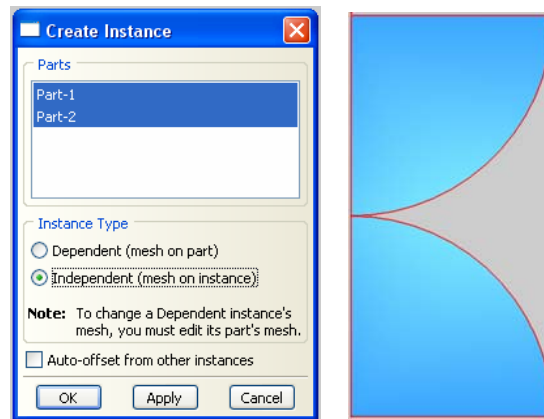


Gambar 3. 14 Part 2 setelah diberi sifat material.

C. Assembly

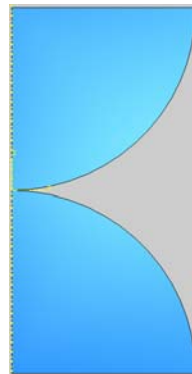
Karena pemodelan menggunakan dua buah *part* yaitu *part 1* dan *part 2* maka kedua *part* tersebut harus digabungkan menjadi satu kesatuan. Berikut ini adalah cara menggabungkan (*assembly*) *part 1* dan *part 2*:

- Pada *context bar* > *Module* > *Assembly*
- Pada *menu bar* > *Instance* > *Create instance*, muncul *dialog box* dan tampilan *viewport* menjadi seperti gambar di bawah



Gambar 3. 15 *Create instance dialog box.*

- Pada *dialog box*:
 - *Part* > *Part 1* dan *Part 2*
 - *Instance type* > *Independent*
 - Ok, tampilan *viewport* menjadi seperti gambar di bawah



Gambar 3. 16 *Assembly part 1 dan part 2.*

Langkah 2 Solution

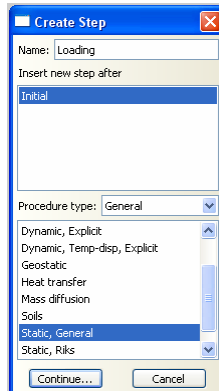
Langkah ini meliputi pembuatan *step*, *interaction*, *load* dan *mesh*

A. Step

Step adalah langkah yang digunakan dalam proses simulasi *Abaqus*, *step* sendiri berfungsi untuk menentukan langkah – langkah analisis, menentukan *out put* yang diinginkan dan membatasi analisis sesuai dengan analisis yang dikehendaki. Berikut ini adalah cara untuk membuat *step* pada pemodelan.

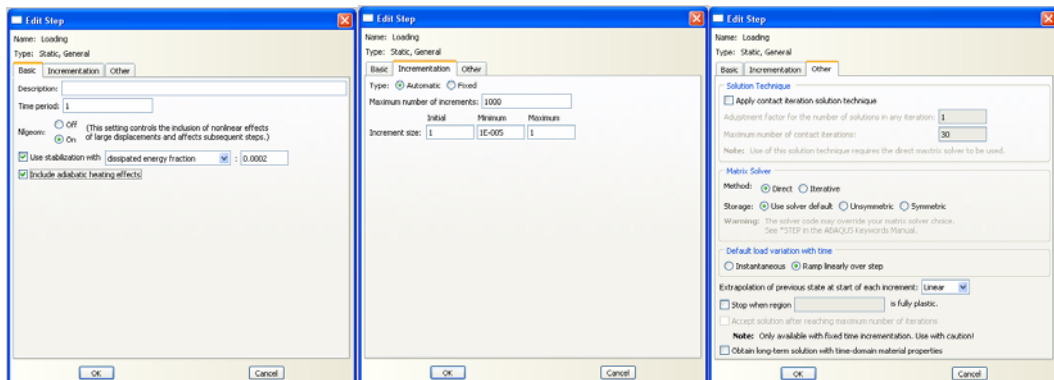
- Pada *context bar* > *Module* > *Step*

- Pada *toolbox area* > *Create Step*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



Gambar 3. 17 Create step dialog box.

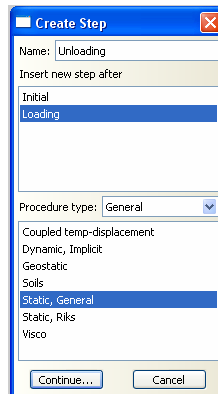
- Pada *dialog box*:
 - *Name* > *Loading*
 - *Procedure type* > *General* > *Static, General*
 - *Continue*, muncul *dialog box edit step* seperti gambar di bawah



Gambar 3. 18 Edit step dialog box.

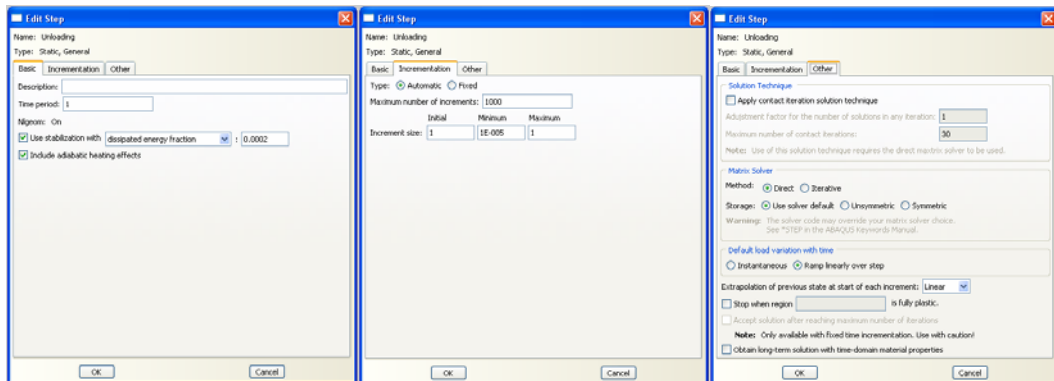
- Pada *dialog box*:
 - Pada *basic*
 - *NLgeom* > *on*
 - *Use stabilization with* > *dissipated energy fraction*: isi 0,0002
 - *Include adiabatic heating effects*
 - Pada *incrementation*
 - *Type* > *Automatic*
 - *Maximum number of increments*: isi 1000
 - *Increment size*: *Initial* = 1, *Minimum* = 0,00001, *Maximum* = 1
 - Pada *other*
 - *Matrix solver*: *Method* > *Direct*, *Storage* > *Use solver default*
 - *Default load variation with time* > *Ramp linearly over step*

- Pada *context bar* > *Module* > *Step*
- Pada *toolbox area* > *Create Step*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



Gambar 3. 19 *Create step dialog box.*

- Pada *dialog box*:
 - *Name* > *Loading*
 - *Procedure type* > *General* > *Static, General*
 - *Continue*, muncul *dialog box edit step* seperti gambar di bawah



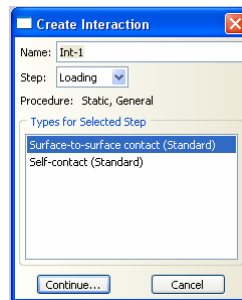
Gambar 3. 20 *Edit step dialog box.*

- Pada *dialog box*:
 - Pada *basic*
 - *NLgeom* > *on*
 - *Use stabilization with* > *dissipated energy fraction*: isi 0,0002
 - *Include adiabatic heating effects*
 - Pada *incrementation*
 - *Type* > *Automatic*
 - *Maximum number of increments*: isi 1000
 - *Increment size*: *Initial* = 1, *Minimum* = 0,00001, *Maximum* = 1
 - Pada *other*
 - *Matrix solver*: *Method* > *Direct*, *Storage* > *Use solver default*
 - *Default load variation with time* > *Ramp linearly over step*

B. Interaction

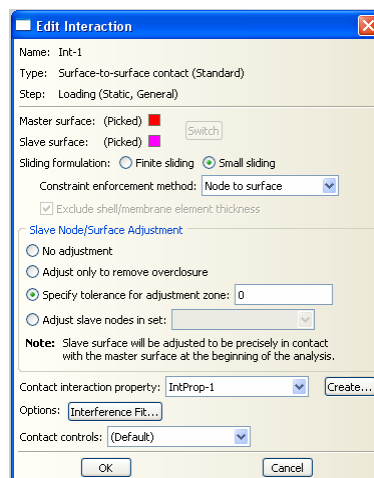
Interaction digunakan untuk membuat kontak, seperti penentuan *master* dan *slave*, penentuan *contact properties*, dan interaksi mekanika. Berikut ini adalah cara membuat *interaction* pada permodelan:

- Pada *context bar* > *Interaction*
- Pada *toolbox area* > *Create Interaction*, muncul *dialog box* seperti di bawah



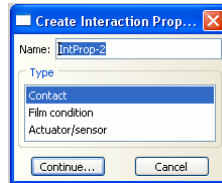
Gambar 3. 21 *Create interaction dialog box.*

- Pada *dialog box*:
 - *Types for Selected Step* > *Surface to surface contact*
 - *Continue*, Selanjutnya pilih *master* pada garis busur area contact (*hemisphere* bagian bawah) yang ditandai dengan warna merah
- Pada *prompt area* > *done*
- Pada *prompt area* > *node region*, pilih *slave* pada garis busur area contact (*hemisphere* bagian atas) yang ditandai dengan warna ungu
- Pada *prompt area* > *done*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



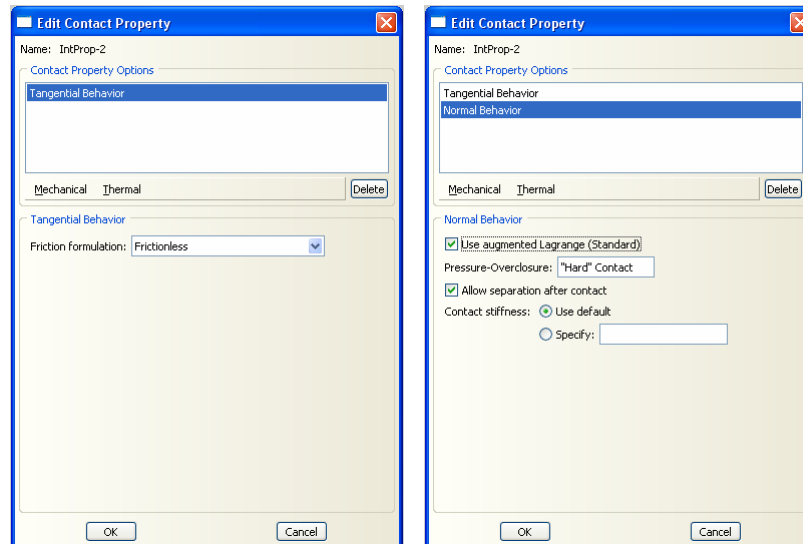
Gambar 3. 22 *Edit interaction tool box.*

- Pada *dialog box*:
 - *Sliding formulation > Small sliding*
 - *Constraint enforcement method > Node to surface*
 - *Specify tolerance for adjustment zone* isi 0
 - *Create . . .*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



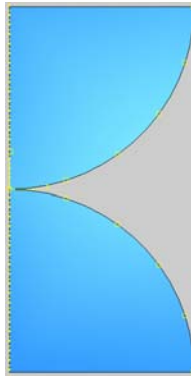
Gambar 3. 23 Create interaction property dialog box.

- Pada *dialog box*:
 - *Type > Contact*
 - *Continue*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



Gambar 3. 24 Edit contact property dialog box.

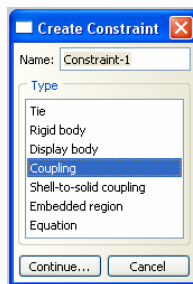
- Pada *dialog box*:
 - *Mechanical > Tangential behavior*
 - *Friction formulation > Frictionless*
 - *Mechanical > Normal behavior*
 - *Mechanical > Use augmented Lagrange*
 - *Allow separation after contact*
 - *Contact stiffness > Use default*
 - Ok, tampilan *viewport* menjadi seperti gambar di bawah



Gambar 3. 25 Plot contact.

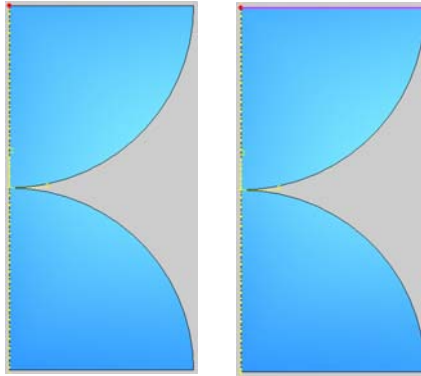
Membuat *Coupling*: *Coupling* disini digunakan untuk meng *couple force* yang diberikan pada suatu titik agar *force* dapat merata pada seluruh permukaan tersebut. Langkahnya sebagai berikut:

- Pada *context bar* > *Module* > *Interaction*
- Pada *toolbox area* > *Create Constraint*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



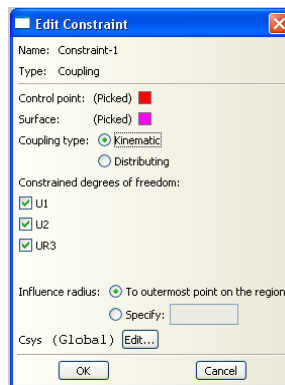
Gambar 3. 26 Create constraint dialog box.

- Pada *dialog box*:
 - *Types* > *Coupling*
 - *Continue*, pilih titik (*control point*) yang akan diberi *force* (ditandai dengan warna merah)
 - Pada *prompt area* > *Node region* pilih *surface control* (ditandai dengan warna ungu)



Gambar 3. 27 Coupling

- Pada *prompt area* > *Done*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah

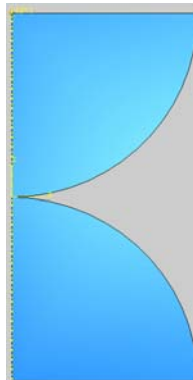


Gambar 3. 28 Edit constraint.

- Pada *dialog box*:
 - *Coupling type* > *Kinematic*
 - *Influence radius* > *To outermost on the region*
 - *Ok*

Membuat *Reference Point*: Langkah membuat *Reference Point* sebagai berikut:

- Pada *menu bar* > *Tool* > *Reference Point* > pilih titik pada ujung bagian atas *hemisphere*

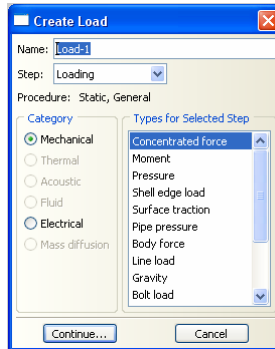


Gambar 3. 29 Reference point.

C. Load

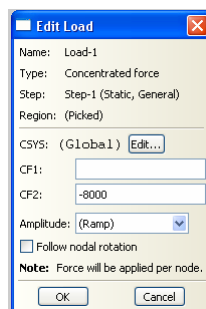
Membuat *Load/force* yang akan diberikan pada pemodelan. Langkah pemodelannya sebagai berikut:

- Pada *context bar* > *Load*
- Pada *toolbox area* > *Create Load*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



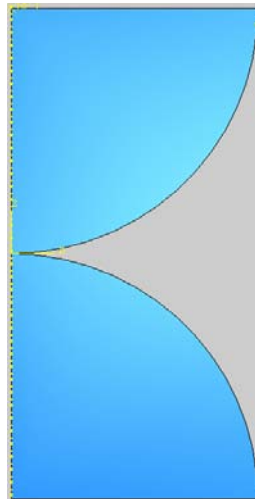
Gambar 3. 30 Create load dialog box.

- Pada *dialog box*:
 - *Category* > *Mechanical*
 - *Types for selected step* > *Concentrated force*
 - *Continue*
- Pada *prompt area* > *select points for the load*, klik pada titik pertemuan garis busur dengan garis horizontal (pada *hemisphere* bagian atas), yang ditandai dengan warna merah
- Pada *prompt area* > *done*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



Gambar 3. 31 Edit load dialog box.

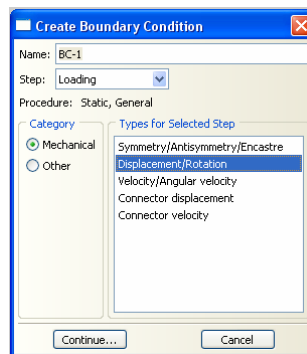
- Pada *dialog box*:
 - Pada CF2 isi -8000
 - Ok



Gambar 3. 32 Hasil akhir penentuan beban.

Selanjutnya menentukan *load/* kondisi batas pada permukaan bagian bawah *hemisphere*, dimana saat *hemisphere* dikenai beban maka nodal yang terdapat pada permukaan bagian bawah *hemispheres* tidak boleh bergerak dalam arah x dan arah y . Sedangkan nodal pada sumbu simetri *hemisphere* tidak boleh bergerak dalam arah sumbu x . Langkah pemodelannya sebagai berikut:

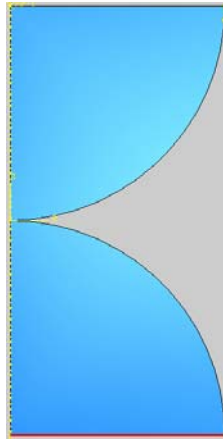
- Pada *context bar* > *Load*
- Pada *toolbox area* > *Create Boundary Condition*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



Gambar 3. 33 Create boundary condition dialog box.

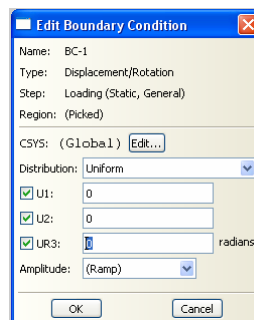
- Pada *dialog box*:
 - *Category* > *Mechanical*
 - *Types for selected step* > *Displacement/rotation*
 - *Continue*

- Pada *prompt area* > *select region for boundary condition*, klik pada bagian bawah *hemisphere* (*hemisphere* bagian bawah) yang ditandai dengan warna merah



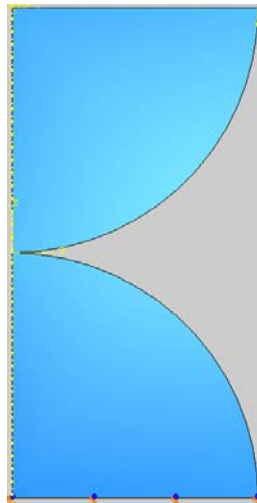
Gambar 3. 34 Garis horizontal yang dipilih.

- Pada *prompt area* > *done*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



Gambar 3. 35 *Edit boundary condition dialog box.*

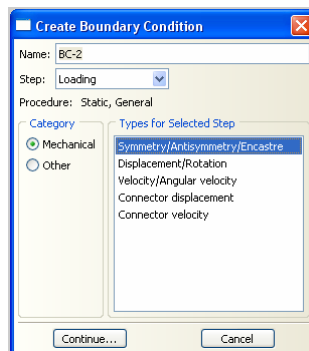
- Pada *dialog box*:
 - Pilih U1 isi 0
 - Pilih U2 isi 0
 - Pilih UR3 isi 0
 - Ok



Gambar 3. 36 Kondisi batas pada bagian bawah.

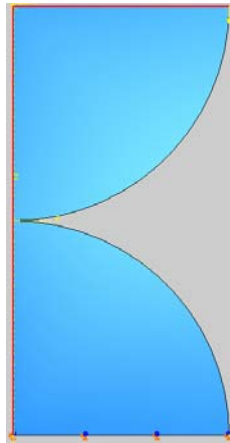
Membuat kondisi batas pada sumbu simetris *hemisphere* agar tidak bergerak arah sumbu x saat terjadinya pembebanan. Berikut ini langkah pemodelannya:

- Pada *context bar* > *Load*
- Pada *toolbox area* > *Create Boundary Condition*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



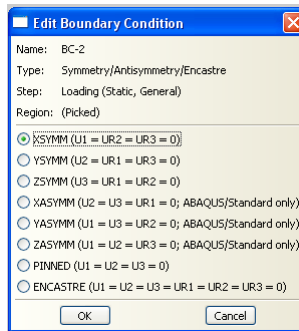
Gambar 3. 37 Create boundary condition dialog box.

- Pada *dialog box*:
 - *Category* > *Mechanical*
 - *Types for selected step* > *Symmetry/Antisymmetry/Encastre*
 - *Continue*
- Pada *Prompt area* > *select region for boundary condition*, klik pada garis vertikal (pada kedua *hemisphere*) dan garis horizontal pada bagian atas, yang ditandai dengan warna merah



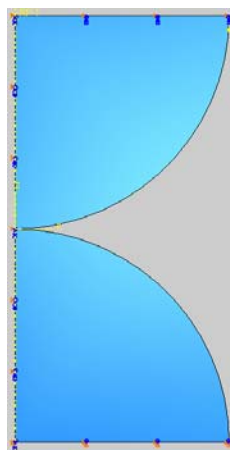
Gambar 3. 38 Garis vertikal dan horizontal yang dipilih.

- Pada *prompt area* > *done*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



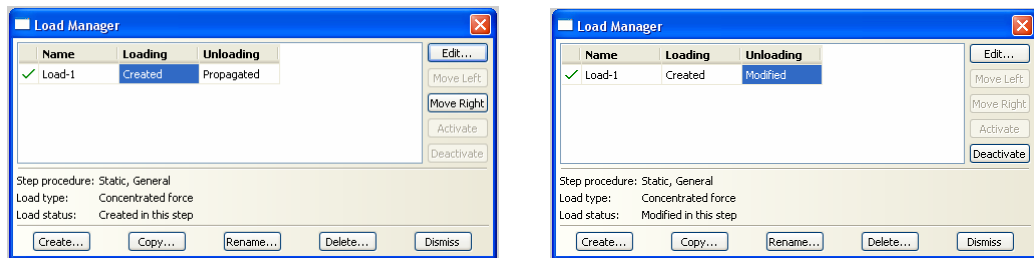
Gambar 3. 39 *Edit boundary condition dialog box.*

- Pada *dialog box*:
 - Pilih XSYMM ($U1=UR2=UR3=0$)
 - Ok



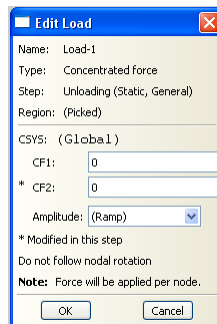
Gambar 3. 40 Kondisi batas pada bagian garis simetri.

- Pada *toolbox area* > *Load manager*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



Gambar 3. 41 Load manager dialog box.

- Pada *dialog box*:
 - Pada *propagated* klik dua kali, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



Gambar 3. 42 Edit load dialog box.

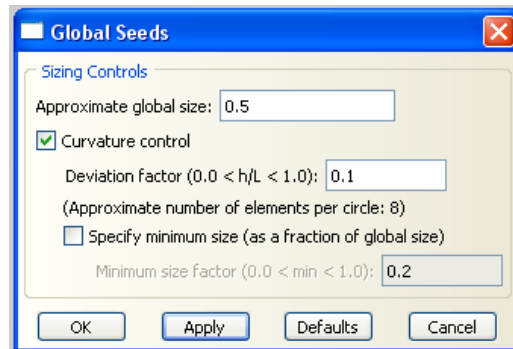
- Pada *dialog box*:
 - CF1 isi 0
 - CF2 isi 0
 - Ok, maka *dialog box* Gambar 3. 40 akan seperti Gambar 3. 39 dilanjutkan dengan klik *Dismiss*

D. Mesh

Proses *meshing* merupakan proses membagi komponen dalam elemen elemen kecil. Berikut ini langkah dalam melakukan *meshing*:

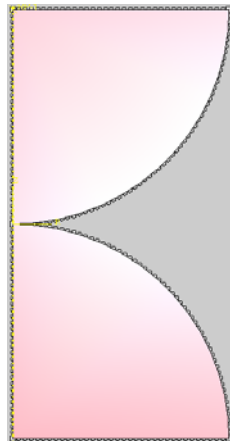
Membuat *global mesh* pada semua *area hemisphere* (R_1 dan R_2). Langkah pemodelannya sebagai berikut:

- Pada *context bar* > *Mesh*
- Pada *toolbox area* > *Seed Part Instance* > blok semua *area hemisphere*
- Pada *prompt area* > *done*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



Gambar 3. 43 Global seeds.

- Pada *dialog box* :
 - Pada *Approximate global size* isi 0,5
 - *Curvature control*
 - Pada *Deviation factor* isi 0,1
 - Ok

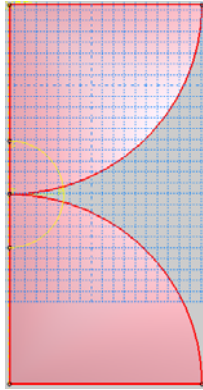


Gambar 3. 44 Hasil global meshing.

Membuat partisi pada bagian permukaan contact *hemisphere* (R_1), hal ini bertujuan untuk membuat *mesh* yang lembut pada bagian titik *contact hemisphere* sehingga akan menghasilkan *visual contour* yang bagus dan *error* yang kecil.

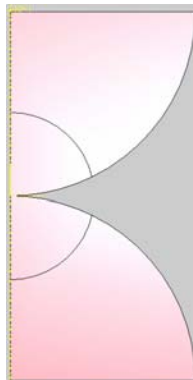
- Pada *context bar* > *Mesh*
- Pada *toolbox area* > *Partition face sketch*, klik pada kedua *hemisphere*
- Pada *prompt area* > *done*

- Pada *toolbox area* > *Create Arc: center and 2 endpoint*, Membuat busur melalui line pada system koordinat, hubungkan garis vertikal pada hemisphere bagian atas dengan garis vertikal pada hemisphere bagian bawah, tekan Esc > *done*



Gambar 3. 45 Pembuatan partisi.

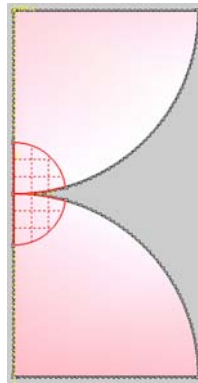
- Pada *toolbox area* > *Auto trim*, untuk memotong busur yang baru saja dibuat



Gambar 3. 46 Hasil pembuatan partisi

Setelah pembuatan partisi, langkah selanjutnya membuat *mesh* pada daerah partisi tersebut, langkahnya sebagai berikut:

- Pada *context bar* > *Mesh*
- Pada *toolbox area* > *Seed edge be Number*, blok pada kedua bagian partisi
- Pada *prompt area* > *done*

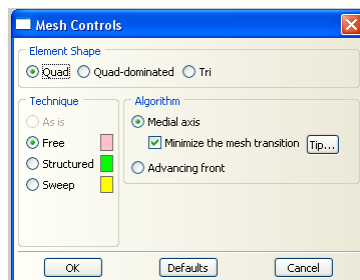


Gambar 3. 47 Pembuatan *mesh* lembut pada partisi.

- Pada *prompt area* > isi 120

Langkah selanjutnya adalah membuat *mesh control* pada *hemisphere* tersebut, langkah pemodelannya sebagai berikut:

- Pada *context bar* > *Mesh*
- Pada *toolbox area* > *Assign Mesh Control*, blok pada kedua bagian partisi
- Pada *Prompt area* > *done*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



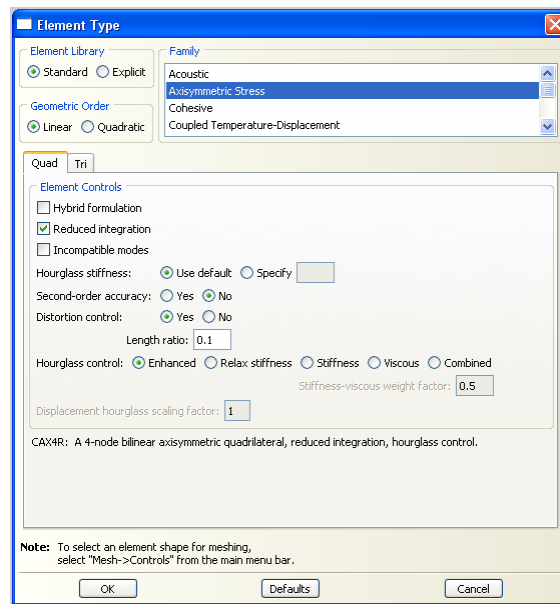
Gambar 3. 48 Mesh control dialog box.

- Pada *dialog box*:
 - *Element shape* > *Quad*
 - *Technique* > *Free*
 - *Algorithm* > *Medial axis*
 - *Ok*

Menentukan *element type* pada kedua *hemisphere* (R_1 dan R_2)

Langkah pemodelannya sebagai berikut:

- Pada *context bar* > *Mesh*
- Pada *toolbox area* > *Assign Element Type* > Blok pada seluruh *hemisphere*
- Pada *Prompt area* > *done*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah

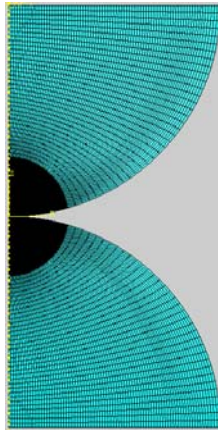


Gambar 3. 49 *Element type dialog box.*

- Pada *dialog box*:
 - *Element library* > *Standard*
 - *Family* > *Axisymmetric stress*
 - *Geometric order* > *Linear*
 - Pada *Quad*
 - *Element controls* > *Reduced integration*
 - *Houglass stiffness* > *Use default*
 - *Second-order accuracy* > *No*
 - *Distortion control* > *Yes*
 - *Length ratio* isi *0,1*
 - *Houglass control* > *Enhanced*
 - *Ok*

Langkah selanjutnya adalah *Mesh Part* yaitu memberikan *mesh* pada *part hemisphere* (R_1 dan R_2) sesuai dengan ketentuan yang telah dibuat. Langkah pemodelannya sebagai berikut:

- Pada *context bar* > *Mesh*
- Pada *toolbox area* > *Mesh Part Instance* > Blok pada seluruh *hemisphere*
- Pada *prompt area* > *done*.



Gambar 3. 50 Hasil akhir *mesh* pada *hemisphere*.

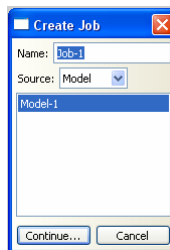
Langkah 3 *Postprocessing*

Langkah ini meliputi pembuatan *Job* dan *visualization*

A. *Job*

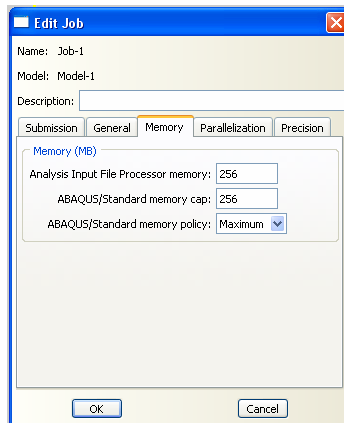
Job adalah proses akhir dari pemecahan masalah pada pemodelan yang dibuat. Langkah pemodelan *job* adalah sebagai berikut:

- Pada *context bar* > *Job*
- Pada *toolbox area* > *Create Job*, Muncul *dialog box* seperti di bawah



Gambar 3. 51 *Create job dialog box*.

- Pada *dialog box*:
 - *Continue*, Muncul *dialog box* seperti gambar di bawah

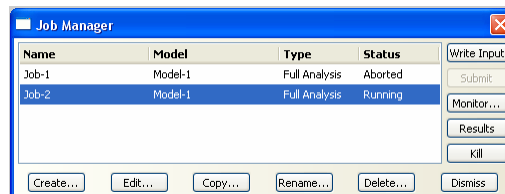


Gambar 3. 52 Edit job dialog box.

- Pada *dialog box* :
 - Pada *Memory*
 - *Analisisi input file processor memory: 256*
 - *Standard memory: 256*
 - *Standard memory policy: Maximum*
 - Ok

Setelah pembuatan *Job* selanjutnya ke proses *Running*. Langkah pemodelannya sebagai berikut:

- Pada *context bar* > *Job*
- Pada *toolbox area* > *Job Manager*, Muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



Gambar 3. 53 Job manager dialog box.

- Pada *dialog box*:
 - *Submit*
 - *Monitor*, Muncul *dialog box* seperti gambar di bawah

Job: Job-2 Status: Running

Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPF Inc
1	1	5	0	3	3	0.00390625	0.00390625	0.00390625
1	2	1	0	3	3	0.0078125	0.0078125	0.00390625
1	3	1	1	3	4	0.0136719	0.0136719	0.00585938
1	4	2	0	4	4	0.0158691	0.0158691	0.00219727
1	5	1	0	3	3	0.019165	0.019165	0.0032959
1	6	1	0	3	3	0.0241089	0.0241089	0.00494385
1	7	2	0	4	4	0.0259628	0.0259628	0.00185394
1	8	1	0	2	2	0.0287437	0.0287437	0.00278091
1	9	1	1	3	4	0.0329151	0.0329151	0.00417137
1	10	1	1	3	4	0.0391722	0.0391722	0.00625706
1	11	1	1	3	4	0.0485578	0.0485578	0.00938559
1	12	1	1	4	5	0.0626361	0.0626361	0.0140784
1	13	2	1	3	4	0.0679155	0.0679155	0.00527939
1	14	1	0	4	4	0.0758346	0.0758346	0.00791909
1	15	2	0	3	3	0.0788043	0.0788043	0.00296966
1	16	1	0	4	4	0.0832588	0.0832588	0.00445449
1	17	1	0	3	3	0.0899405	0.0899405	0.00668173
1	18	1	1	7	8	0.0999631	0.0999631	0.0100226

Log Errors Warnings Output

Submitted: Wed Aug 25 07:47:46 2010
 Started: Analysis Input File Processor
 Completed: Analysis Input File Processor
 Started: ABAQUS/Standard

kill Dismiss

Gambar 3. 54 Job monitor dialog box.

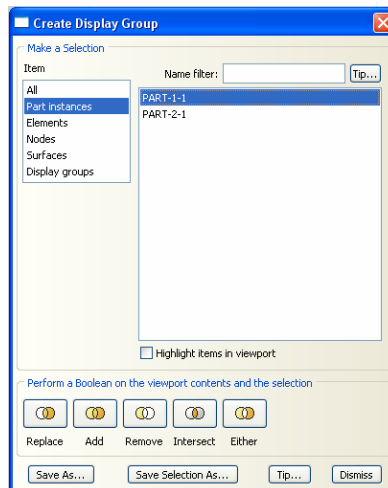
B. Visualization

Untuk melihat hasil plot deformasi kedua *hemisphere* (ω_1) atau (ω_2) pada pemodelan menggunakan *ABAQUS 6.5* dapat dilakukan dengan langkah sebagai berikut:

Pada contoh di bawah ini dilakukan pengukuran deformasi pada rasio radius spesimen $(R_1/R_2) = 1$.

Pengukuran deformasi (ω_{R1}) *hemisphere* 1 (R_1):

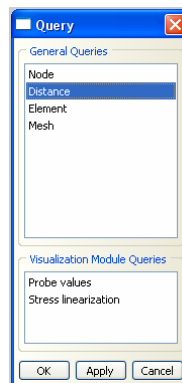
- Pada *context bar* > *Visualization*
- Pada *toolbar* > *Create Display Group*, Muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



Gambar 3. 55 Create display group dialog box.

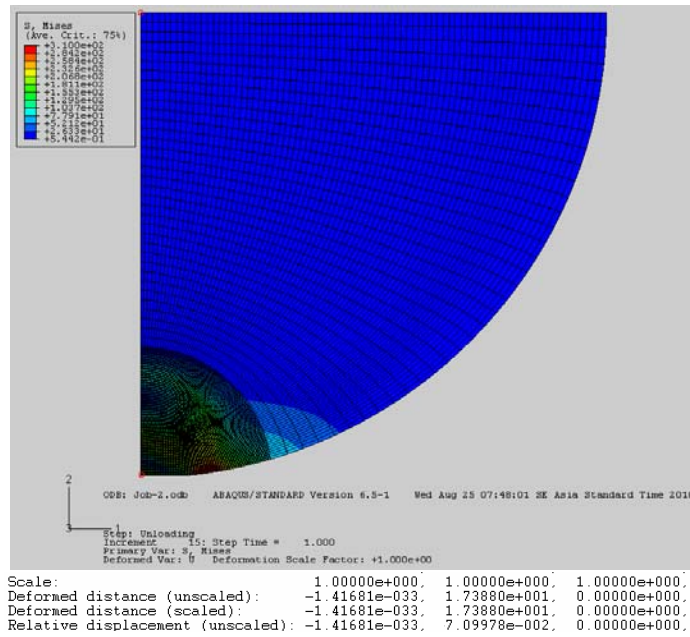
- Pada *dialog box*:
 - *Item* > *Part instances*
 - *PART-1-1*
 - *Replace*
 - *Dismiss*

- Pada Menu bar:
 - *Tool* > *Query*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



Gambar 3. 56 Query dialog box.

- Pada *dialog box*:
 - *General Query* > *Distance*
 - Ok, Pilih nodal ujung *hemisphere* dan ujung nodal pada daerah kontak searah sumbu *y*

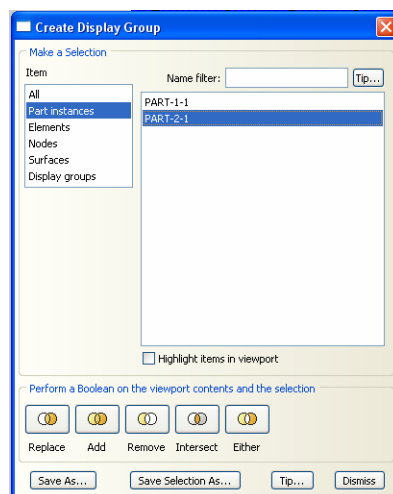


Gambar 3. 57 Pengukuran deformasi pada R_1 (ω_{R1}).

Dari *message area* dapat dibaca *relative displacement* pada kolom 2 (sumbu 2) sebesar 0,0709, merupakan besarnya deformasi (ω_{R1}) *hemisphere* 1 (R_1).

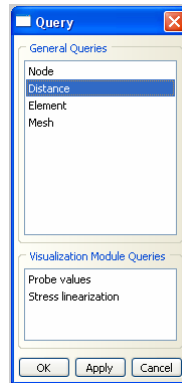
Pengukuran deformasi (ω_{R2}) *hemisphere* 2 (R_2):

- Pada *context bar* > *Visualization*
- Pada *toolbar* > *Create Display Group*, Muncul *dialog box* seperti di bawah



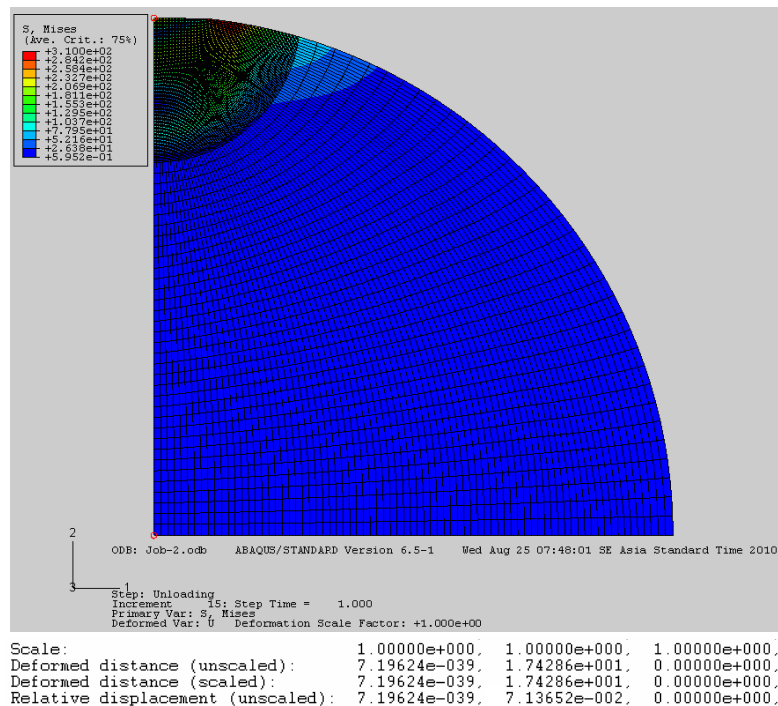
Gambar 3. 58 Create display group dialog box.

- Pada *dialog box*:
 - *Item > Part instances*
 - *PART-2-1*
 - *Replace*
 - *Dismiss*
- Pada *Menu bar*:
 - *Tool > Query*, muncul *dialog box* seperti gambar di bawah



Gambar 3. 59 Query dialog box.

- Pada *dialog box*:
 - *General Query > Distance*
 - Ok, Pilih nodal ujung *hemisphere* dan ujung nodal pada daerah kontak searah sumbu y



Gambar 3. 60 Pengukuran deformasi pada R_2 (ω_{R_2}).

Dari *message area* dapat dibaca *relative displacement* pada kolom 2 (sumbu 2) sebesar 0,0714, merupakan besarnya deformasi (ω_{R_2}) *hemisphere 2* (R_2).

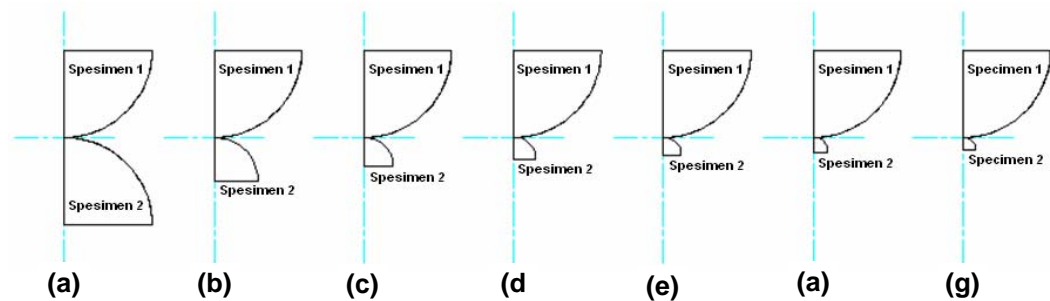
Jadi perbandingan deformasi yang terjadi adalah:

$$\begin{aligned} \frac{\omega_{R_1}}{\omega_{R_2}} &= \frac{0,0709}{0,0714} \\ &= 0,9930 \end{aligned}$$

Untuk memperoleh perbandingan deformasi plastis pada rasio radius yang lain ($R_1/R_2 = 2$, $R_1/R_2 = 3$, $R_1/R_2 = 4$, $R_1/R_2 = 5$, $R_1/R_2 = 6$ dan $R_1/R_2 = 7$) dilakukan dengan langkah-langkah yang sama seperti di atas.

3.3.3 Simulasi

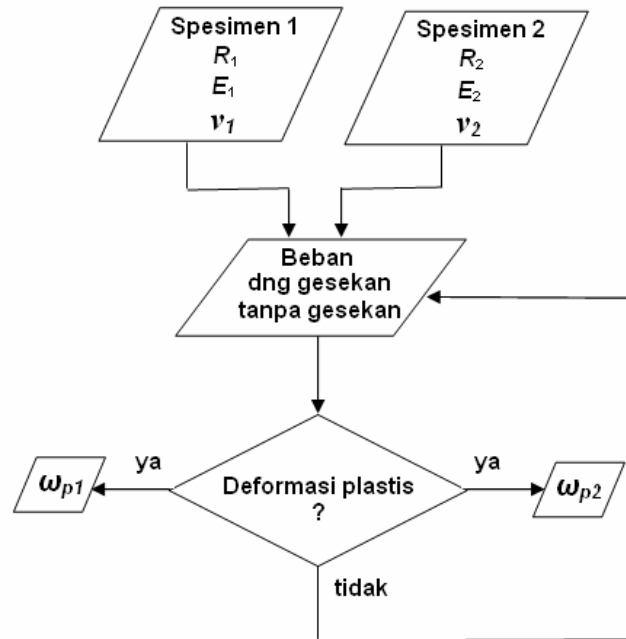
Dalam pelaksanaan simulasi masing masing model pasangan spesimen seperti pada Gambar 3. 42, menggunakan prosedur seperti skema diagram alir simulasi elemen hingga pada Gambar 3. 43.



Gambar 3. 61 Variasi perbandingan R_1/R_2 : (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4, (e) 5, (f) 6, (g) 7.

Spesimen 1 dan spesimen 2 dikontakkan, kemudian pada spesimen 1 diberi beban kearah bawah dan pada sumbu y dikonstrains agar tidak dapat bergerak kearah sumbu x sementara spesimen 2 dikonstrains pada sumbu y agar tidak dapat bergerak kearah sumbu x dan pada bagian bawah dikonstrains agar tidak dapat bergerak kearah sumbu x maupun y . Pensimulasian dilakukan menggunakan dua variasi beban yakni 8000 N dan 11000 N, pada beban 8000 N

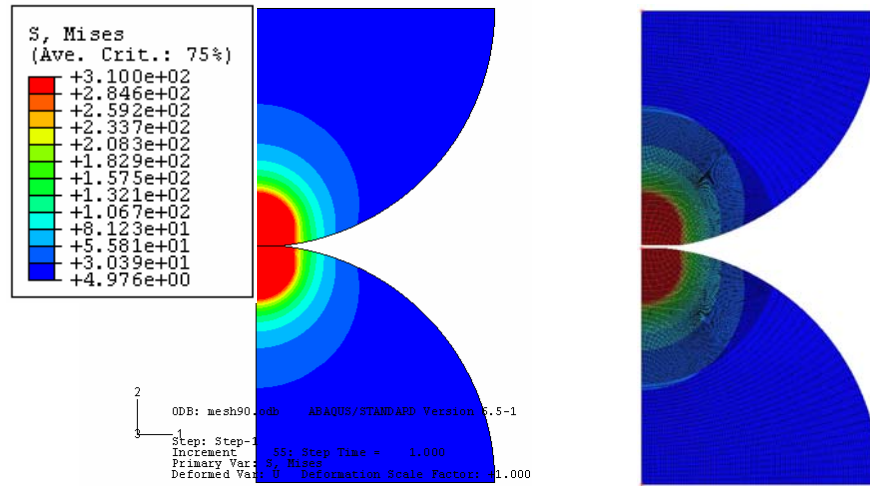
dilakukan menggunakan dua variabel kondisi, yakni kondisi dengan gesekan dan tanpa gesekan. Akibat beban yang diberikan maka akan terjadi deformasi, bila deformasi yang terjadi adalah deformasi plastis (ditandai dengan timbulnya tegangan kontak yang melebihi tegangan *yield* bahan) maka deformasi yang terjadi dapat diukur, tetapi bila belum terjadi deformasi plastis maka beban diperbesar.



Gambar 3. 62 Diagram alir simulasi elemen hingga.

Dalam pensimulasian hanya diberikan contoh simulasi untuk beban 8000 N tanpa gesekan sebagai berikut:

A. Model perbandingan geometri $R_1 : R_2 = 1$



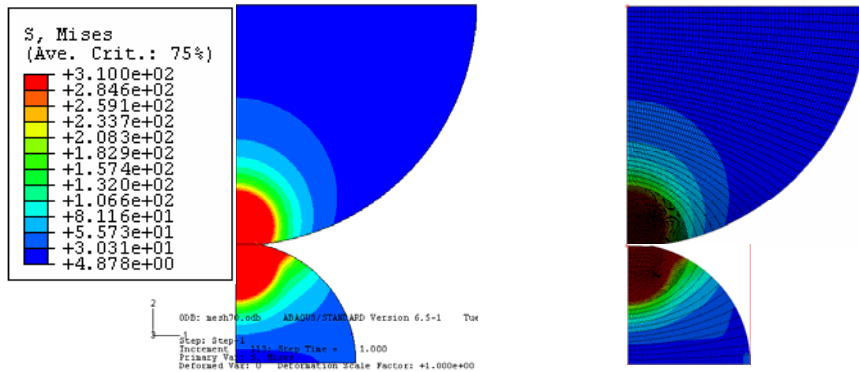
(a)

(b)

Scale:	1.00000e+000,	1.00000e+000,	
Deformed distance (unscaled):	-1.18079e-032,	-1.74042e+001,	
Deformed distance (scaled):	-1.18079e-032,	-1.74042e+001,	
Relative displacement (unscaled):	-1.18079e-032,	9.58327e-002,	ω_{p1}
Scale:	1.00000e+000,	1.00000e+000,	
Deformed distance (unscaled):	-6.74249e-038,	-1.74043e+001,	
Deformed distance (scaled):	-6.74249e-038,	-1.74043e+001,	
Relative displacement (unscaled):	-6.74249e-038,	9.56510e-002,	ω_{p2}

Gambar 3. 63 Pada $R_1/R_2 = 1$ (a) Distribusi tegangan, (b) Deformasi kontak.

B. Model perbandingan geometri $R_1 : R_2 = 2$



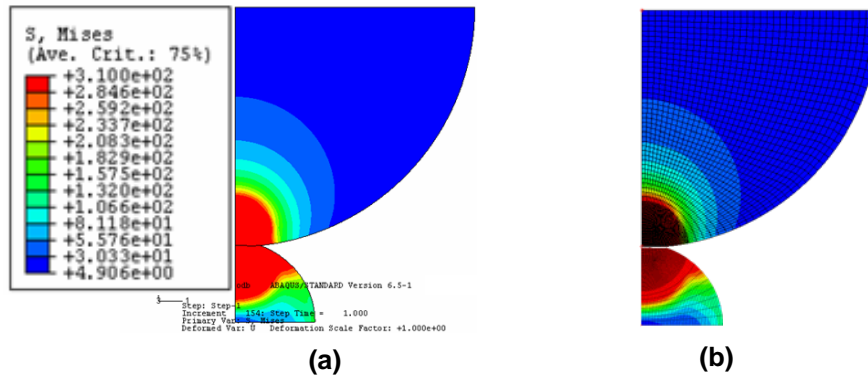
(a)

(b)

Scale:	1.00000e+000,	1.00000e+000,	
Deformed distance (unscaled):	-1.19314e-032,	-1.73976e+001,	
Deformed distance (scaled):	-1.19314e-032,	-1.73976e+001,	
Relative displacement (unscaled):	-1.19314e-032,	1.02376e-001,	ω_{p1}
Scale:	1.00000e+000,	1.00000e+000,	
Deformed distance (unscaled):	-4.56951e-038,	-8.59543e+000,	
Deformed distance (scaled):	-4.56951e-038,	-8.59543e+000,	
Relative displacement (unscaled):	-4.56951e-038,	1.54568e-001,	ω_{p2}

Gambar 3. 64 Pada $R_1/R_2 = 2$ (a) Distribusi tegangan, (b) Deformasi kontak.

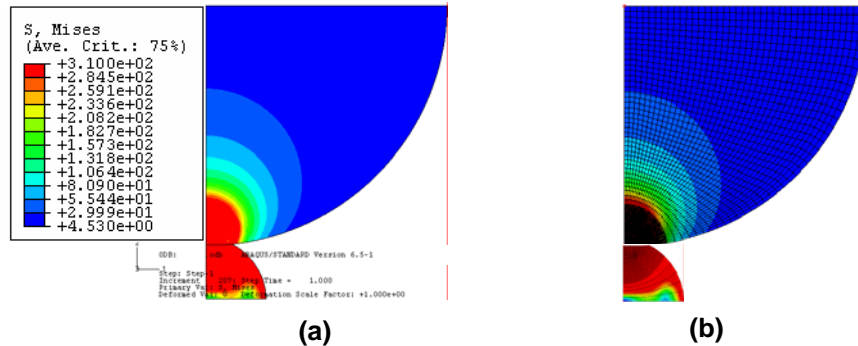
C. Model perbandingan geometri $R_1 : R_2 = 3$



Scale:	1.000000e+000,	1.000000e+000,	
Deformed distance (unscaled):	-1.64316e-032,	-1.74096e+001,	
Deformed distance (scaled):	-1.64316e-032,	-1.74096e+001,	
Relative displacement (unscaled):	-1.64316e-032,	<u>9.03939e-002</u> ,	ω_{p1}
Scale:	1.000000e+000,	1.000000e+000,	
Deformed distance (unscaled):	-7.23106e-038,	-5.57836e+000,	
Deformed distance (scaled):	-7.23106e-038,	-5.57836e+000,	
Relative displacement (unscaled):	-7.23106e-038,	<u>2.54640e-001</u> ,	ω_{p2}

Gambar 3. 65 Pada $R_1/R_2 = 3$ (a) Distribusi tegangan, (b) Deformasi kontak.

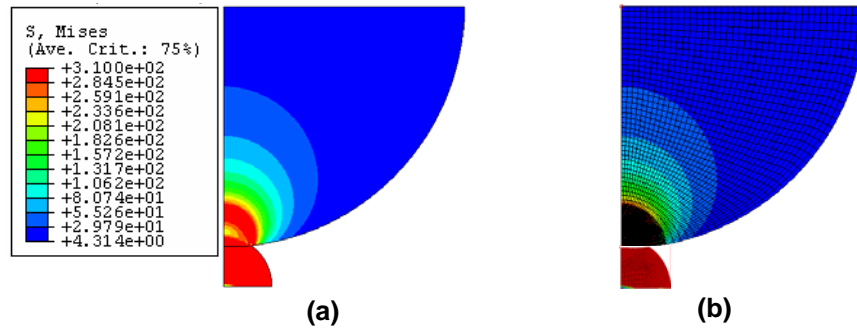
D. Model perbandingan geometri $R_1 : R_2 = 4$



Scale:	1.000000e+000,	1.000000e+000,	
Deformed distance (unscaled):	1.24732e-032,	1.74246e+001,	
Deformed distance (scaled):	1.24732e-032,	1.74246e+001,	
Relative displacement (unscaled):	1.24732e-032,	<u>7.54189e-002</u> ,	ω_{p1}
Scale:	1.000000e+000,	1.000000e+000,	
Deformed distance (unscaled):	-3.53104e-038,	-3.98247e+000,	
Deformed distance (scaled):	-3.53104e-038,	-3.98247e+000,	
Relative displacement (unscaled):	-3.53104e-038,	<u>3.92529e-001</u> ,	ω_{p2}

Gambar 3. 66 Pada $R_1/R_2 = 4$ (a) Distribusi tegangan, (b) Deformasi kontak.

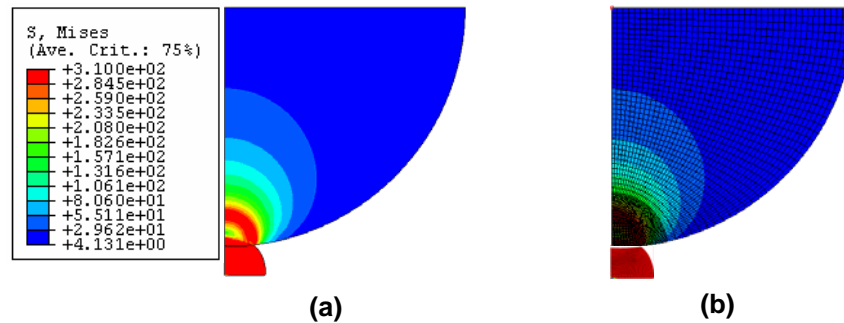
E. Model perbandingan geometri $R_1 : R_2 = 5$



Scale:	1.00000e+000,	1.00000e+000,	
Deformed distance (unscaled):	1.25387e-032,	1.74334e+001,	
Deformed distance (scaled):	1.25387e-032,	1.74334e+001,	
Relative displacement (unscaled):	1.25387e-032,	6.66385e-002,	ω_{p1}
Scale:	1.00000e+000,	1.00000e+000,	
Deformed distance (unscaled):	-3.07577e-037,	-2.92542e+000,	
Deformed distance (scaled):	-3.07577e-037,	-2.92542e+000,	
Relative displacement (unscaled):	-3.07577e-037,	5.74579e-001,	ω_{p2}

Gambar 3. 67 Pada $R_1/R_2 = 5$ (a) Distribusi tegangan, (b) Deformasi kontak.

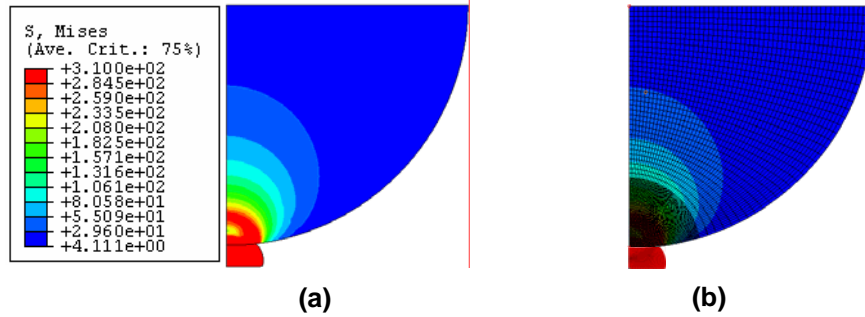
F. Model perbandingan geometri $R_1 : R_2 = 6$



Scale:	1.00000e+000,	1.00000e+000,	
Deformed distance (unscaled):	8.27775e-033,	1.74452e+001,	
Deformed distance (scaled):	8.27775e-033,	1.74452e+001,	
Relative displacement (unscaled):	8.27775e-033,	5.48256e-002,	ω_{p1}
Scale:	1.00000e+000,	1.00000e+000,	
Deformed distance (unscaled):	-1.38477e-037,	-2.06968e+000,	
Deformed distance (scaled):	-1.38477e-037,	-2.06968e+000,	
Relative displacement (unscaled):	-1.38477e-037,	8.46916e-001,	ω_{p2}

Gambar 3. 68 Pada $R_1/R_2 = 6$ (a) Distribusi tegangan, (b) Deformasi kontak.

G. Model perbandingan geometri $R_1 : R_2 = 7$



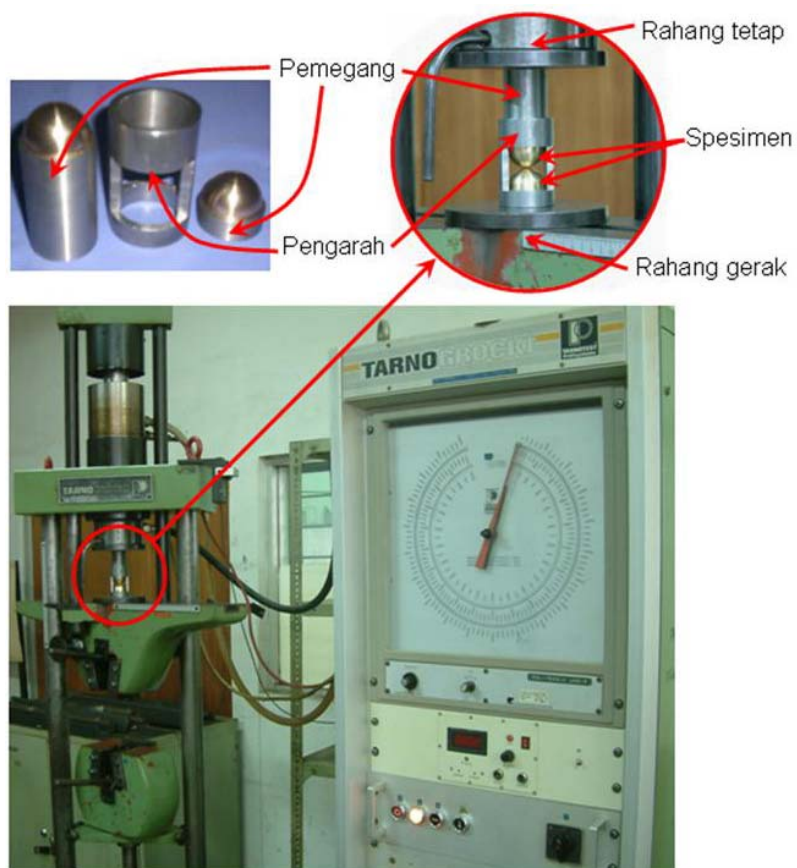
Scale:	1.00000e+000,	1.00000e+000,	
Deformed distance (unscaled):	7.36338e-031,	1.74423e+001,	
Deformed distance (scaled):	7.36338e-031,	1.74423e+001,	
Relative displacement (unscaled):	7.36338e-031,	5.77356e-002	ω_{p1}
Scale:	1.00000e+000,	1.00000e+000,	
Deformed distance (unscaled):	-2.30252e-035,	-1.48491e+000,	
Deformed distance (scaled):	-2.30252e-035,	-1.48491e+000,	
Relative displacement (unscaled):	-2.30252e-035,	1.01509e+000	ω_{p2}

Gambar 3. 69 Pada $R_1/R_2 = 7$ (a) Distribusi tegangan, (b) Deformasi kontak.

Bab 4 EKSPERIMEN

4.1 Prosedur Eksperimen

Eksperimen dilakukan pada mesin uji tekan, kedua spesimen masing-masing dipasang pada pemegangnya kemudian kedua pemegang beserta spesimennya dipasang pada pengarah dengan posisi saling berhadapan sehingga terjadi kontak di permukaan yang berbentuk setengah bola. Peralatan tersebut diletakkan diantara rahang tetap dengan rahang gerak, sehingga ketika rahang gerak diberi beban maka kedua spesimen akan saling menekan. Beban yang diberikan sebesar 8000 dan 11000 N selama 1 menit.



Gambar 4. 1 Mesin uji tekan.

4.2 Spesimen

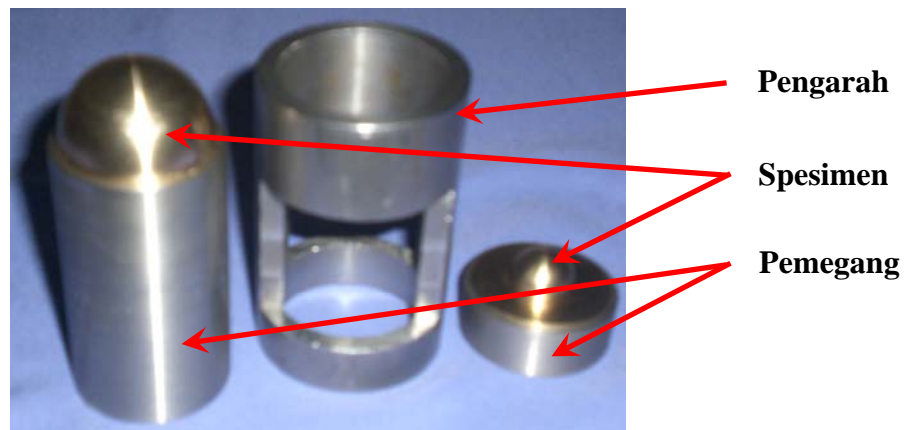
Bentuk setengah bola dibuat dari bahan *brass* ($H = 0,31$ GPa, $E = 96000$ MPa, $\nu = 0,3$) dengan radius: 17,5; 8,75; 5,84; 4,38; 3,5; 2,92; dan 2,5 mm.



Gambar 4. 2 Spesimen.

4.3 Peralatan Pendukung

Spesimen dipasang pada pemegangnya dengan suaian sliding sehingga menjamin keduanya sesumbu seperti Gambar 4.3, masing-masing pemegang beserta spesimen dimasukkan kedalam pengarah saling berhadapan sehingga kedua spesimen saling kontak seperti Gambar 4.1, agar kedua spesimen sesumbu maka hubungan pemegang dan pengarah dibuat suaian sliding.



Gambar 4. 3 Pengarah, spesimen, dan pemegang.

4.4 Detail 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 4.4.



Gambar 4. 4 Micrometer dan center locator.

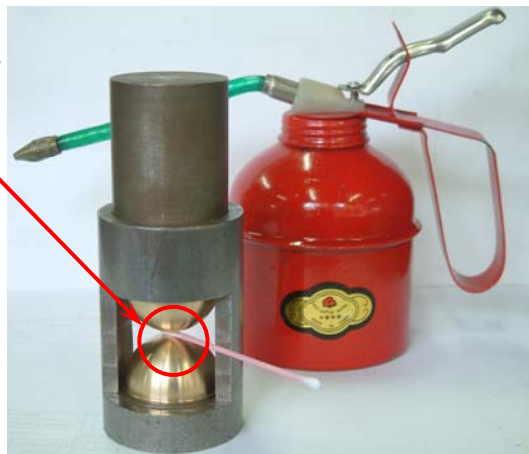
Eksperimen dilakukan menggunakan 2 beban, kelompok pertama menggunakan beban 8000 N dan kelompok kedua 11000 N. Eksperimen dilakukan dengan cara menekan spesimen pada mesin uji tekan. Pada eksperimen ini menggunakan 7 macam perbandingan pasangan, mulai dari pasangan spesimen yang memiliki perbandingan radius 1:1; 2:1; 3:1; 4:1; 5:1; 6:1; dan 7:1, agar hasil eksperimen akurat tiap perbandingan pasangan dibuat 3 pasang spesimen. Pada kelompok pertama ini eksperimen dilakukan menggunakan dua kondisi kontak, yakni kondisi kering (tanpa pelumas) dan kondisi dilumasi. Untuk melakukan eksperimen kondisi kering sebelum spesimen dipasang pada pengarah dibersihkan menggunakan alkohol terlebih dahulu, dikeringkan di udara bebas dan diukur arah axial seperti Gambar 4. 5, kemudian baru dipasang pada mesin uji tekan untuk dilakukan pengujian.



Gambar 4. 5 Pengukuran spesimen sebelum diuji.

Untuk melakukan eksperimen kondisi dilumasi langkahnya sedikit berbeda, yakni spesimen diberi pelumas dahulu setelah dipasang pada pengarah seperti Gambar 4. 6, kemudian baru dipasang pada mesin uji tekan untuk dilakukan pengujian.

Cotton buds yang diberi pelumas



Gambar 4. 6 Pemberian pelumas pada spesimen.

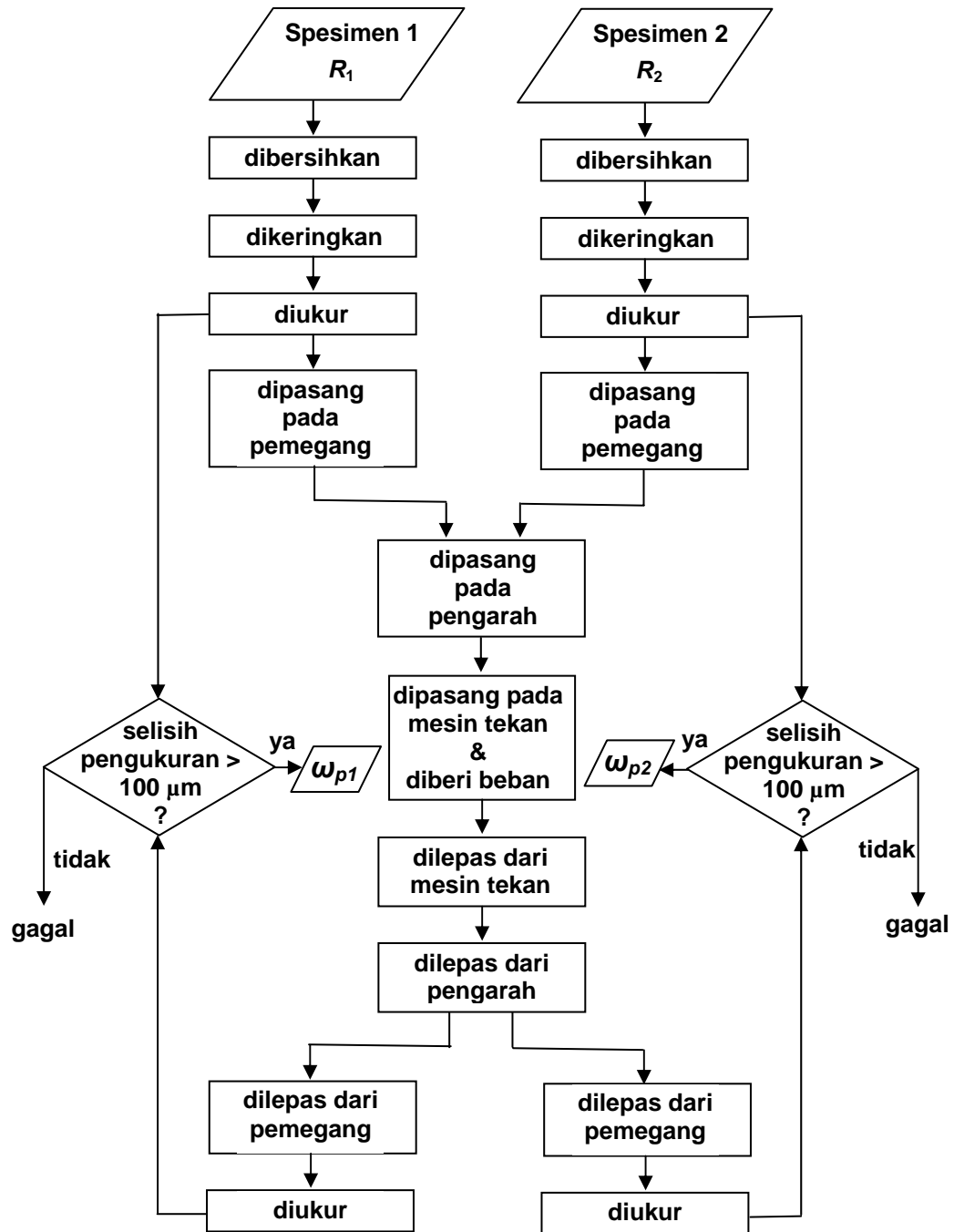
Pembebanan tiap pasang spesimen dilakukan dengan menahan beban sebesar 8000 N selama 1 menit, kemudian beban ditiadakan. Setelah spesimen dilepas dari pemegangnya kemudian diukur lagi arah axial seperti Gambar 4.7, selisih panjang spesimen sebelum dengan setelah diuji merupakan besarnya deformasi yang terjadi pada masing masing spesimen.



Gambar 4. 7 Pengukuran spesimen setelah diuji.

Kemudian dilanjutkan eksperimen kelompok 2 dengan langkah yang sama tetapi beban yang diberikan sebesar 11000 N. Pada pengujian kelompok ini hanya dilakukan pada kondisi tidak dilumasi.

Langkah pelaksanaan eksperimen yang diuraikan di atas bila dipaparkan menggunakan diagram alir dapat dilihat di bawah.



Gambar 4. 8 Diagram alir eksperimen.

Bab 5 HASIL DAN PEMBAHASAN

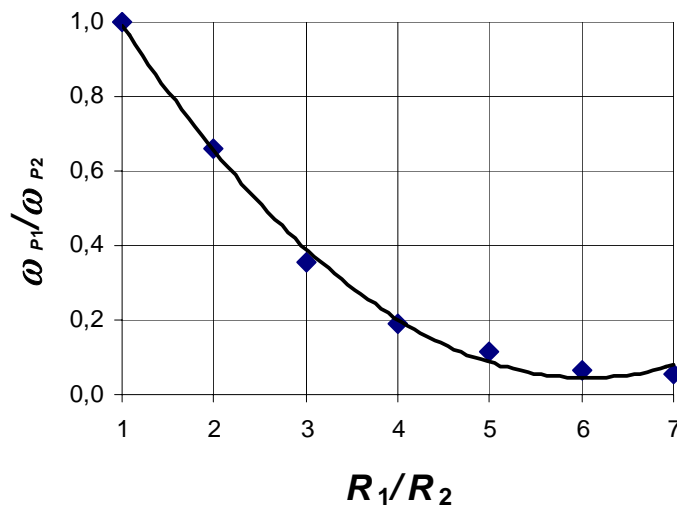
5.1 Hasil Simulasi

5.1.1 Simulasi untuk Beban 8000 N tanpa Gesekan

Dari hasil simulasi dengan beban 8000 N dan *Modulus elastisitas material* ($E_1 = E_2 = 96$ GPa), *yield strength* ($Y = 310$ MPa), *friction koefisien* ($\mu = 0$) dan *Possion's ratio* ($\nu_1 = \nu_2 = 0.34$) bila ditabelkan kemudian dibuat grafik dapat dilihat di bawah.

Tabel 5.1 Deformasi spesimen untuk beban 8000 N tanpa gesekan.

R_1/R_2	ω_{P1}	ω_{P2}	ω_{P1}/ω_{P2}
1	0,096	0,096	1,001
2	0,102	0,155	0,662
3	0,090	0,255	0,355
4	0,075	0,393	0,192
5	0,067	0,575	0,116
6	0,055	0,846	0,065
7	0,058	1,015	0,057



Gambar 5.1 Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 8000 N dan $\mu = 0$.

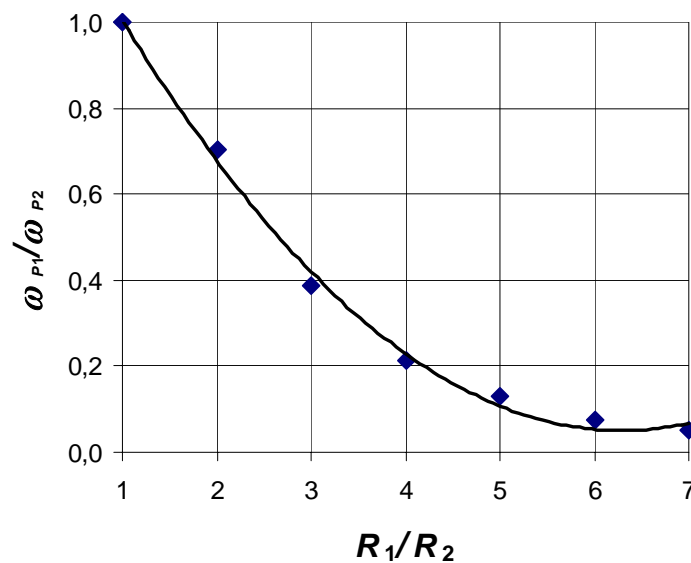
Pada Gambar 5.1 terlihat bahwa rasio deformasi plastis semakin rendah ketika rasio radius benda kontak meningkat. Hal tersebut dapat dikatakan pada masing-masing pasangan, spesimen yang geometrinya lebih kecil mengalami deformasi lebih besar dari pada spesimen yang geometrinya besar.

5. 1. 2 Simulasi untuk Beban 8000 N dengan Gesekan

Dari hasil simulasi dengan beban 8000 N dan *Modulus elastisitas material* ($E_1 = E_2 = 96$ GPa), *yield strength* ($Y = 310$ MPa), *friction koefisien* ($\mu = 0,2$) dan *Possion's ratio* ($\nu_1 = \nu_2 = 0.34$) bila ditabelkan kemudian dibuat grafik dapat dilihat di bawah.

Tabel 5. 2 Deformasi spesimen untuk beban 8000 N dengan $\mu = 0,2$.

R_1/R_2	ω_{P1}	ω_{P2}	ω_{P1}/ω_{P2}
1	0,094	0,094	1,001
2	0,107	0,152	0,703
3	0,098	0,252	0,389
4	0,082	0,385	0,213
5	0,072	0,560	0,129
6	0,058	0,783	0,074
7	0,050	0,976	0,052



Gambar 5. 2 Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 8000 N dan $\mu = 0,2$.

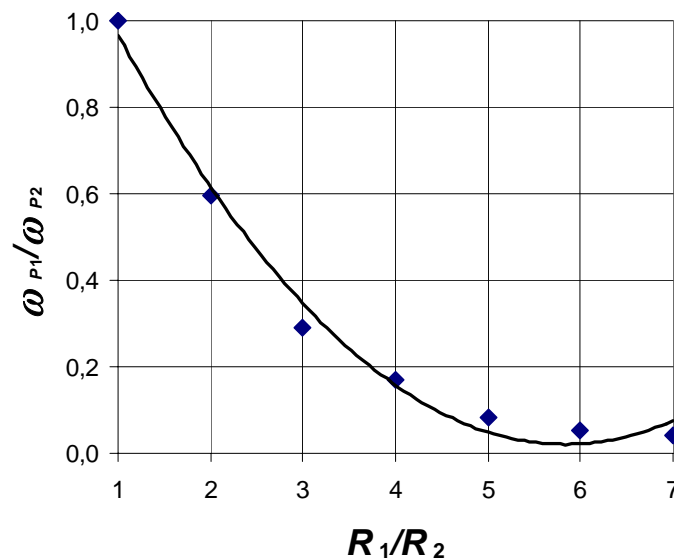
Pada Gambar 5.2 terlihat bahwa rasio deformasi plastis semakin rendah ketika rasio radius benda kontak meningkat. Hal tersebut dapat dikatakan pada masing-masing pasangan, spesimen yang geometrinya lebih kecil mengalami deformasi lebih besar dari pada spesimen yang geometrinya besar.

5. 1. 3 Simulasi untuk Beban 11000 N dengan Gesekan

Dari hasil simulasi dengan beban 11000 N dan *Modulus elastisitas material* ($E_1 = E_2 = 96$ GPa), *yield strength* ($Y = 310$ MPa), *friction koefisien* ($\mu = 0$) dan *Possion's ratio* ($\nu_1 = \nu_2 = 0.34$) bila ditabelkan kemudian dibuat grafik dapat dilihat di bawah.

Tabel 5. 3 Deformasi spesimen untuk beban 11000 N dengan $\mu = 0,2$.

R_1/R_2	ω_{P1}	ω_{P2}	ω_{P1}/ω_{P2}
1	0,125	0,125	0,998
2	0,129	0,217	0,596
3	0,110	0,376	0,292
4	0,084	0,496	0,169
5	0,076	0,916	0,083
6	0,063	1,184	0,054
7	0,058	1,379	0,042



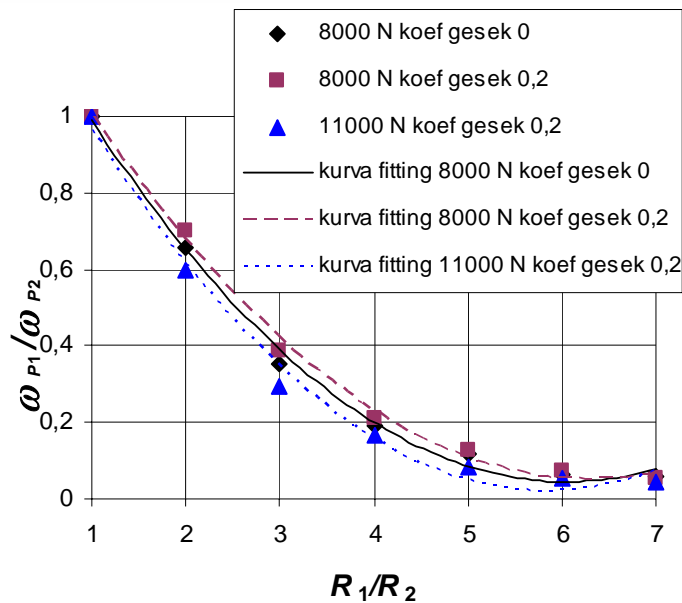
Gambar 5. 3 Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 11000 N dan $\mu = 0,2$.

Pada Gambar 5.3 terlihat bahwa rasio deformasi plastis semakin rendah ketika rasio radius benda kontak meningkat. Hal tersebut dapat dikatakan pada masing-masing pasangan, spesimen yang geometrinya lebih kecil mengalami deformasi lebih besar dari pada spesimen yang geometrinya besar.

Dari hasil ketiga simulasi dengan kondisi yang berbeda tersebut bila ditabelkan kemudian dibuat grafik dapat dilihat di bawah.

Tabel 5. 4 Deformasi spesimen.

R_1/R_2	Beban 8000 N $\mu = 0$			Beban 8000 N $\mu = 0,2$			Beban 11000 N $\mu = 0,2$		
	ω_{P1}	ω_{P2}	$\frac{\omega_{P1}}{\omega_{P2}}$	ω_{P1}	ω_{P2}	$\frac{\omega_{P1}}{\omega_{P2}}$	ω_{P1}	ω_{P2}	$\frac{\omega_{P1}}{\omega_{P2}}$
1	0,096	0,096	1,001	0,094	0,094	1,001	0,125	0,125	0,998
2	0,102	0,155	0,662	0,107	0,152	0,703	0,129	0,217	0,596
3	0,090	0,255	0,355	0,098	0,252	0,389	0,110	0,376	0,292
4	0,075	0,393	0,192	0,082	0,385	0,213	0,084	0,496	0,169
5	0,067	0,575	0,116	0,072	0,560	0,129	0,076	0,916	0,083
6	0,055	0,846	0,065	0,058	0,783	0,074	0,063	1,184	0,054
7	0,058	1,015	0,057	0,050	0,976	0,052	0,058	1,379	0,042



Gambar 5. 4 Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 gabungan.

Pada Gambar 5.4 perbandingan kurva antara beban 8000 N tanpa gesekan dengan beban 8000 N dengan koefisien gesek 0,2 terlihat ada perbedaan sedikit mengenai harga penurunan rasio deformasi plastis terhadap rasio radius benda kontak. Pada kurva untuk beban 8000 N dengan koefisien gesek 0,2 penurunannya lebih kecil dari pada kurva untuk beban 8000 N tanpa gesekan.

Perbandingan kurva antara beban 8000 N dengan koefisien gesek 0,2 dengan beban 11000 N dengan koefisien gesek 0,2 terlihat ada perbedaan sedikit mengenai harga penurunan rasio deformasi plastis terhadap rasio radius benda kontak. Pada kurva untuk beban 11000 N dengan koefisien gesek 0,2 penurunannya lebih besar dari pada kurva untuk beban 8000 N dengan koefisien gesek 0,2.

5.2 Hasil Eksperimen

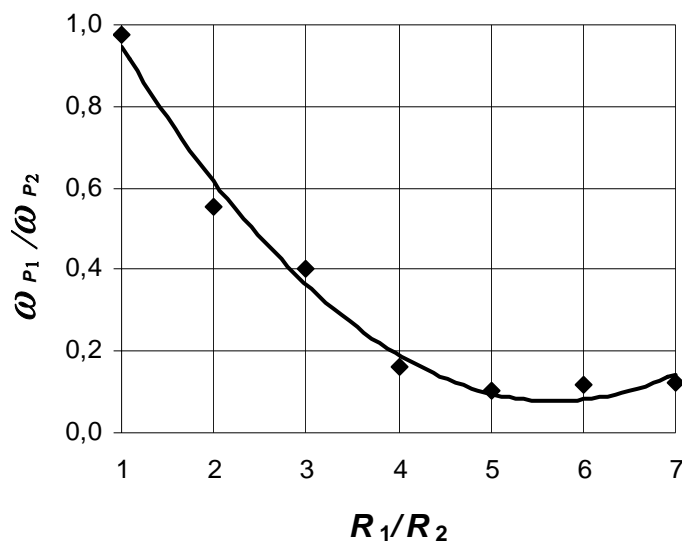
5.2.1 Hasil Pengukuran Spesimen untuk Beban 8000 N tanpa Gesekan

Pengukuran spesimen kelompok beban 8000 N dengan menggunakan pelumas sebelum dan setelah diuji dapat dilihat pada Tabel 5.5.

Tabel 5.5 Deformasi tiap spesimen untuk beban 8000 N tanpa gesekan.

R_1/R_2	No	L_{R1o}	L_{R1d}	ω_{P1}	Mean ω_{P1}	No	L_{R2o}	L_{R2d}	ω_{P2}	Mean ω_{P2}	ω_{P1}/ω_{P2}
1	1.1	20,578	20,455	0,123	0,121	1	20,545	20,422	0,123	0,124	0,973
	1.2	20,556	20,438	0,118		2	20,491	20,366	0,125		
	1.3	20,475	20,354	0,121		3	20,486	20,362	0,124		
2	2.1	20,659	20,562	0,097	0,098	1	11,634	11,456	0,178	0,176	0,556
	2.2	20,588	20,490	0,098		2	11,670	11,495	0,175		
	2.3	20,467	20,368	0,099		3	11,664	11,488	0,176		
3	3.1	20,519	20,398	0,121	0,125	1	8,971	8,653	0,318	0,310	0,404
	3.2	20,618	20,490	0,128		2	8,995	8,690	0,305		
	3.3	20,523	20,397	0,126		3	8,958	8,652	0,306		
4	4.1	20,293	20,208	0,085	0,085	1	7,278	6,750	0,528	0,529	0,161
	4.2	20,355	20,268	0,087		2	7,326	6,795	0,531		
	4.3	20,285	20,201	0,084		3	7,393	6,866	0,527		
5	5.1	20,305	20,238	0,067	0,069	1	6,398	5,735	0,663	0,666	0,103
	5.2	20,304	20,234	0,070		2	6,490	5,821	0,669		
	5.3	20,348	20,279	0,069		3	6,461	5,794	0,667		
6	6.1	20,201	20,110	0,091	0,085	1	5,715	4,980	0,735	0,734	0,116
	6.2	20,262	20,179	0,083		2	5,778	5,044	0,734		
	6.3	20,510	20,429	0,081		3	5,750	5,018	0,732		
7	7.1	20,381	20,289	0,092	0,103	1	5,171	4,307	0,864	0,854	0,121
	7.2	20,369	20,260	0,109		2	5,229	4,380	0,849		
	7.3	20,350	20,241	0,109		3	5,188	4,338	0,850		

Berdasar Tabel 5.5 bila dibuat grafik hasilnya dapat dilihat pada Gambar 5.5.



Gambar 5.5 Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 8000 N tanpa gesekan.

Pada Gambar 5.5 terlihat bahwa rasio deformasi plastis semakin rendah ketika rasio radius benda kontak meningkat. Hal tersebut dapat dikatakan pada masing-masing pasangan, spesimen yang geometrinya lebih kecil mengalami deformasi lebih besar dari pada spesimen yang geometrinya besar.

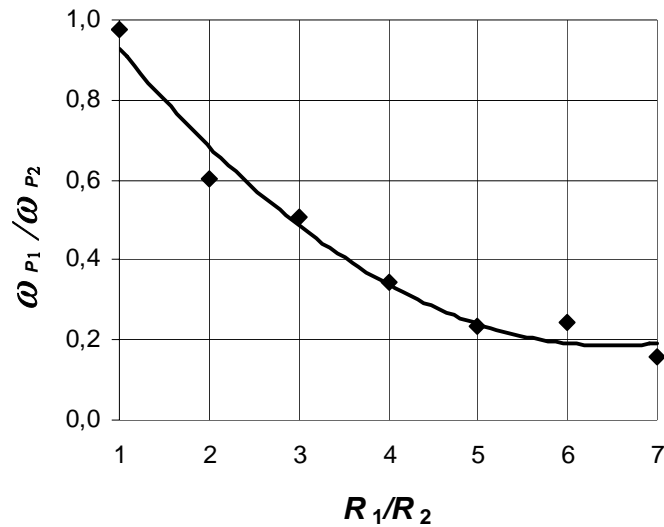
5. 2. 2 Hasil Pengukuran Spesimen untuk Beban 8000 N dengan Gesekan

Pengukuran spesimen kelompok beban 8000 N tanpa menggunakan pelumas sebelum dan setelah diuji dapat dilihat pada Tabel 5.6.

Tabel 5. 6 Deformasi tiap spesimen untuk beban 8000 N dengan gesekan.

R_1/R_2	No	L_{R1o}	L_{R1d}	ω_{P1}	Mean ω_{P1}	No	L_{R2o}	L_{R2d}	ω_{P2}	Mean ω_{P2}	ω_{P1}/ω_{P2}
1	1.1	20,397	20,290	0,107	0,110	1	20,176	20,065	0,111	0,112	0,976
	1.2	20,475	20,366	0,109		2	20,232	20,120	0,112		
	1.3	20,421	20,308	0,113		3	20,408	20,294	0,114		
2	2.1	20,329	20,238	0,091	0,094	1	11,559	11,402	0,157	0,157	0,601
	2.2	20,128	20,033	0,095		2	11,548	11,392	0,156		
	2.3	20,419	20,322	0,097		3	11,521	11,363	0,158		
3	3.1	20,439	20,329	0,110	0,109	1	8,425	8,208	0,217	0,215	0,507
	3.2	20,352	20,244	0,108		2	8,512	8,296	0,216		
	3.3	20,371	20,262	0,109		3	8,527	8,315	0,212		
4	4.1	20,464	20,357	0,107	0,107	1	6,998	6,684	0,314	0,313	0,343
	4.2	20,381	20,273	0,108		2	6,986	6,674	0,312		
	4.3	20,450	20,343	0,107		3	6,925	6,612	0,313		
5	5.1	20,128	20,017	0,111	0,114	1	6,231	5,748	0,483	0,485	0,235
	5.2	20,419	20,306	0,113		2	6,022	5,538	0,484		
	5.3	20,149	20,031	0,118		3	6,118	5,629	0,489		
6	6.1	20,162	20,041	0,121	0,121	1	5,890	5,333	0,557	0,497	0,244
	6.2	20,368	20,248	0,120		2	5,998	5,569	0,429		
	6.3	20,352	20,229	0,123		3	5,989	5,485	0,504		
7	7.1	20,329	20,266	0,063	0,081	1	5,766	5,309	0,457	0,515	0,157
	7.2	20,117	20,033	0,084		2	5,545	5,021	0,524		
	7.3	20,319	20,224	0,095		3	5,542	4,978	0,564		

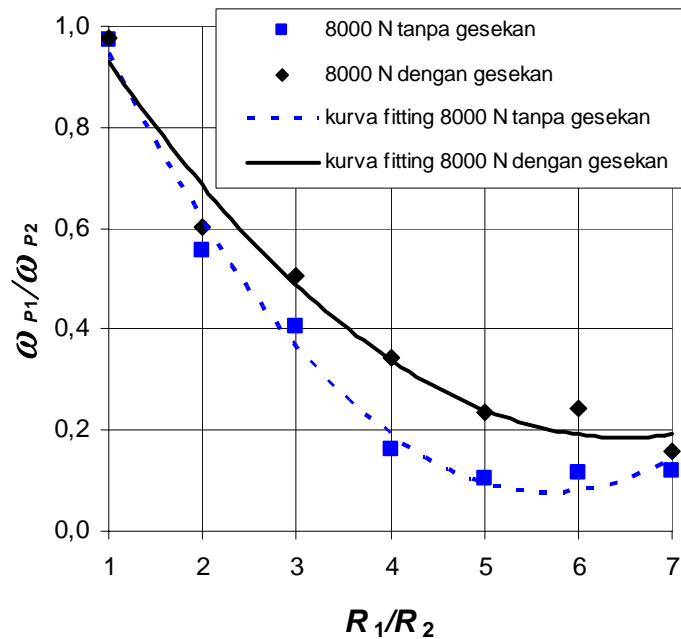
Berdasar Tabel 5.6 bila dibuat grafik hasilnya dapat dilihat pada Gambar 5.6.



Gambar 5. 6 Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 8000 N dengan gesekan.

Pada Gambar 5.6 terlihat bahwa rasio deformasi plastis semakin rendah ketika rasio radius benda kontak meningkat. Hal tersebut dapat dikatakan pada masing-masing pasangan, spesimen yang geometrinya lebih kecil mengalami deformasi lebih besar dari pada spesimen yang geometrinya besar.

Berdasar Tabel 5.5 dan Tabel 5.6 bila dibuat grafik hasilnya dapat dilihat pada Gambar 5.7.



Gambar 5. 7 Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 8000 N dengan dan tanpa gesekan.

Dari Gambar 5.7 perbandingan kurva antara beban 8000 N dengan gesekan (tanpa pelumas) dengan beban 8000 N tanpa gesekan (dengan pelumas) terlihat ada perbedaan mengenai harga penurunan rasio deformasi plastis terhadap rasio radius benda kontak. Pada kurva untuk beban 8000 N dengan pelumas penurunannya lebih besar dari pada kurva untuk beban 8000 N tanpa pelumas.

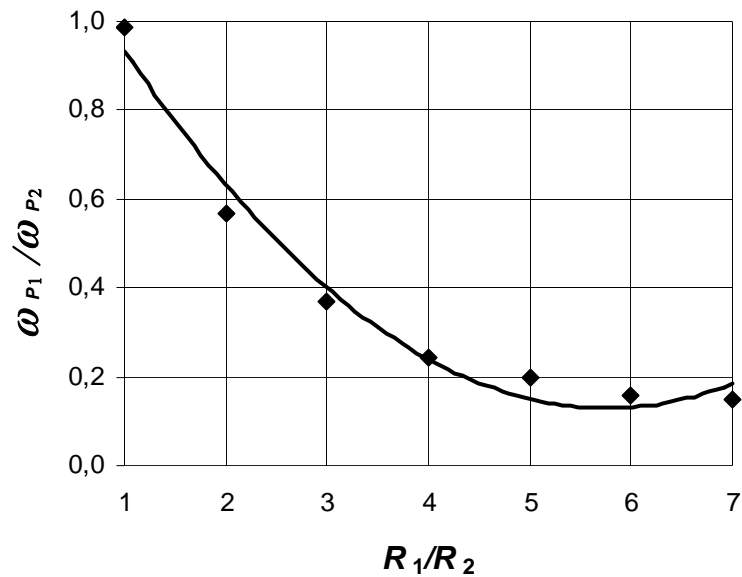
5. 2. 3 Hasil Pengukuran Spesimen untuk Beban 11000 N dengan Gesekan

Pengukuran spesimen kelompok beban 11000 N tanpa menggunakan pelumas sebelum dan setelah diuji dapat dilihat pada Tabel 5.7.

Tabel 5. 7 Deformasi tiap spesimen untuk beban 11000 N dengan gesekan.

R_1/R_2	No	L_{R1o}	L_{R1d}	ω_{P1}	Mean ω_{P1}	No	L_{R2o}	L_{R2d}	ω_{P2}	Mean ω_{P2}	$\omega_{P1} / \omega_{P2}$
1	1.1	20,194	20,056	0,138	0,133	1	20,206	20,067	0,139	0,135	0,985
	1.2	20,153	20,002	0,151		2	20,334	20,180	0,154		
	1.3	20,246	20,136	0,110		3	20,287	20,175	0,112		
2	2.1	20,131	19,987	0,144	0,147	1	11,745	11,480	0,265	0,259	0,568
	2.2	20,250	20,115	0,135		2	11,853	11,569	0,284		
	2.3	20,364	20,201	0,163		3	11,577	11,348	0,229		
3	3.1	20,137	19,987	0,150	0,141	1	8,843	8,480	0,363	0,380	0,371
	3.2	20,192	20,023	0,169		2	8,878	8,524	0,354		
	3.3	20,124	20,021	0,103		3	8,912	8,490	0,422		
4	4.1	20,303	20,167	0,136	0,135	1	7,395	6,825	0,570	0,558	0,243
	4.2	20,264	20,132	0,132		2	7,309	6,760	0,549		
	4.3	20,133	19,995	0,138		3	7,392	6,837	0,555		
5	5.1	20,332	20,200	0,132	0,128	1	6,821	6,157	0,664	0,640	0,200
	5.2	20,316	20,193	0,123		2	6,770	6,163	0,607		
	5.3	20,133	20,004	0,129		3	6,810	6,160	0,650		
6	6.1	20,145	20,007	0,138	0,117	1	6,283	5,518	0,765	0,743	0,157
	6.2	20,192	20,087	0,105		2	6,158	5,452	0,706		
	6.3	20,387	20,279	0,108		3	6,192	5,434	0,758		
7	7.1	20,112	19,946	0,166	0,143	1	5,462	4,438	1,024	0,967	0,147
	7.2	20,382	20,253	0,129		2	5,497	4,540	0,957		
	7.3	20,272	20,139	0,133		3	5,411	4,490	0,921		

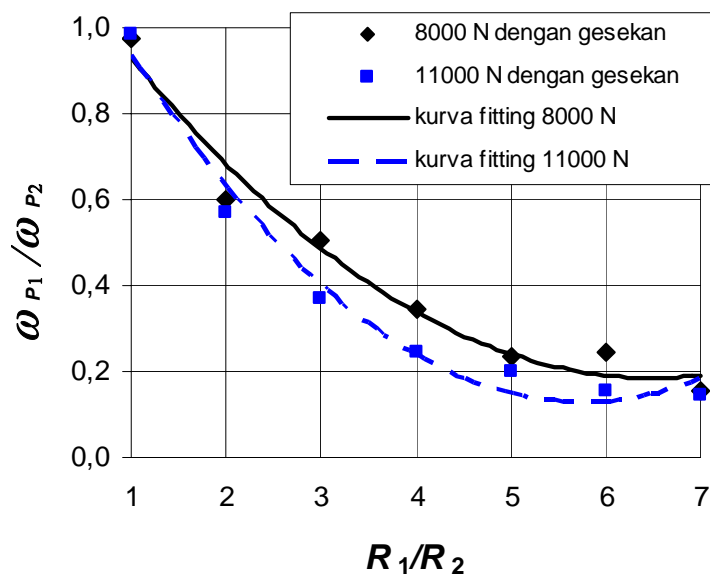
Berdasar Tabel 5.7 bila dibuat grafik hasilnya dapat dilihat pada Grafik 5.8.



Gambar 5. 8 Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 11000 N dengan gesekan.

Pada Gambar 5.8 terlihat bahwa rasio deformasi plastis semakin rendah ketika rasio radius benda kontak meningkat. Hal tersebut dapat dikatakan pada masing-masing pasangan, spesimen yang geometrinya lebih kecil mengalami deformasi lebih besar dari pada spesimen yang geometrinya besar.

Berdasar Tabel 5.6 dan Tabel 5.7 bila dibuat grafik hasilnya dapat dilihat pada Gambar 5.9.



Gambar 5. 9 Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 8000 N dan 11000 N.

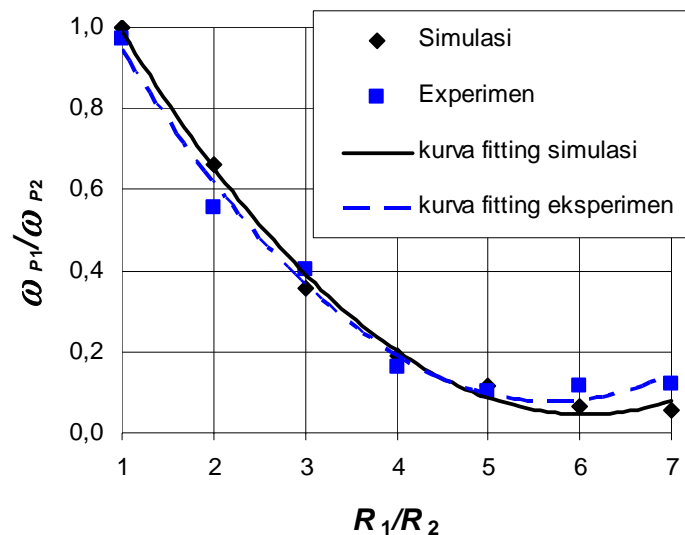
Perbandingan kurva antara beban 8000 N dengan gesekan (tanpa pelumas) dengan beban 11000 N dengan gesekan (tanpa pelumas) terlihat ada perbedaan mengenai harga penurunan rasio deformasi plastis terhadap rasio radius benda kontak. Pada kurva untuk beban 11000 N tanpa pelumas penurunannya lebih besar dari pada kurva untuk beban 8000 N tanpa pelumas.

5.3 Perbandingan Hasil Simulasi dengan Hasil Eksperimen

5.3.1 Perbandingan pada Beban 8000 N tanpa Gesekan

Hasil simulasi harus diverifikasi dengan hasil eksperimen sehingga diperoleh gambaran yang jelas dari hasil penelitian ini agar dapat memperoleh jawaban mengenai tujuan penelitian yang termuat pada Bab 1.

Perbandingan Grafik hasil simulasi dengan hasil eksperimen untuk beban 8000 N tanpa gesekan dapat dilihat pada Gambar 5. 10.

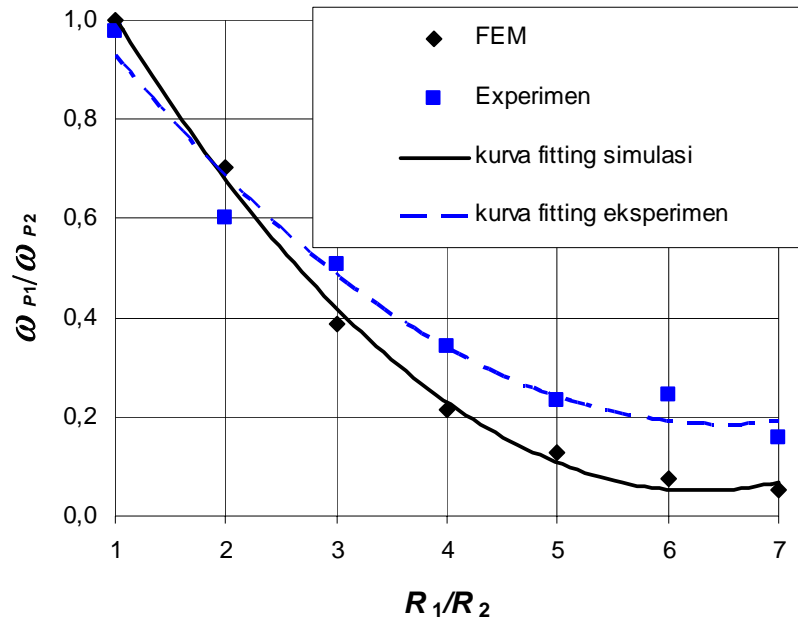


Gambar 5. 10 Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 8000 N tanpa gesekan (hasil simulasi dan eksperimen).

Dari Gambar 5. 10 dapat disimpulkan bahwa bentuk kurva yang menggambarkan hubungan rasio deformasi plastis terhadap rasio radius spesimen, memiliki kecenderungan yang mendekati sama antara hasil simulasi dengan hasil eksperimen.

5.3.2 Perbandingan pada Beban 8000 N dengan Gesekan

Perbandingan Grafik hasil simulasi dengan hasil eksperimen untuk beban 8000 N dengan gesekan dapat dilihat pada Gambar 5. 11.

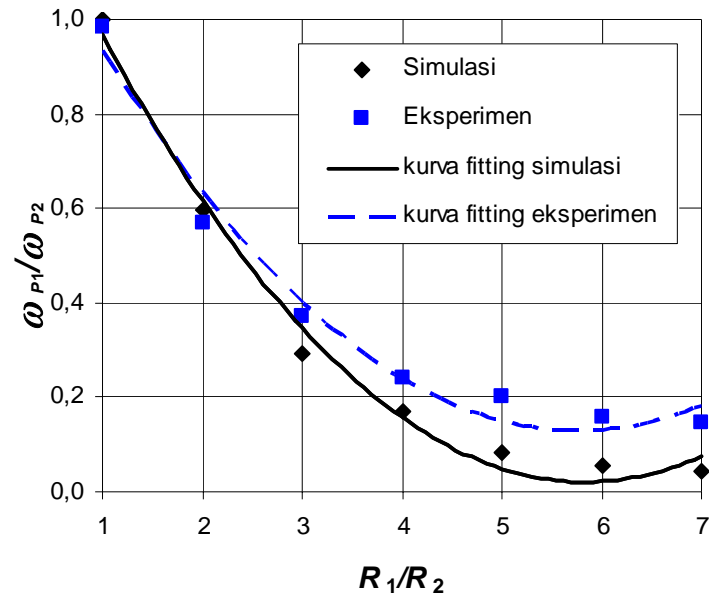


Gambar 5. 11 Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R_1/R_2 untuk beban 800 N dengan gesekan (hasil simulasi dan eksperimen).

Dari Gambar 5. 11 dapat disimpulkan bahwa bentuk kurva yang menggambarkan hubungan rasio deformasi plastis terhadap rasio radius spesimen, memiliki kecenderungan yang mendekati sama antara hasil simulasi dengan hasil eksperimen.

5.3.3 Perbandingan pada Beban 11000 N dengan Gesekan

Perbandingan Grafik hasil simulasi dengan hasil eksperimen untuk beban 11000 N dapat dilihat pada Gambar 5. 12.



Gambar 5. 12 Grafik ω_{p1}/ω_{p2} vs R_1/R_2 untuk beban 11000 N dengan gesekan (hasil simulasi dan eksperimen).

Dari Gambar 5. 12 dapat disimpulkan bahwa bentuk kurva yang menggambarkan hubungan rasio deformasi plastis terhadap rasio radius spesimen, memiliki kecenderungan yang mendekati sama antara hasil simulasi dengan hasil eksperimen.

Bab 6 KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

6.1.1 Pembuktian Hipotesis Johnson, K. L. dan Shercliff, H. R.

Hipotesis Johnson, K. L. dan Shercliff, H. R. (1992) yang menyatakan bahwa ketika terjadi kontak asperiti dua benda yang memiliki kekerasan sama, kedalaman deformasi plastis adalah sama untuk masing-masing benda, tidak terikat pada ukuran geometrinya.

Dari hasil simulasi dan eksperimen seperti dibahas di atas dapat disimpulkan bahwa hipotesis Johnson, K. L. dan Shercliff, H. R. tersebut tidak sama dengan hasil penelitian penulis, hasil penelitian penulis adalah “ketika terjadi kontak asperiti dua benda yang memiliki kekerasan sama, kedalaman deformasi plastis adalah tidak sama, terikat pada ukuran geometrinya”. Hal tersebut dapat dilihat dari kenyataan bahwa rasio deformasi plastis semakin rendah ketika rasio radius benda kontak meningkat.

6.1.2 Verifikasi Terhadap Pernyataan Johnson, K. L. dan Shercliff, H. R. dengan Jamari

Pernyataan Johnson, K. L. dan Shercliff, H. R. (1992) dengan pernyataan Jamari (2006) secara eksplisit berbeda. Jamari (2006) menyatakan bahkan “pada benda yang memiliki kekerasan yang sama, tingkat deformasi plastis benda kontak berbeda secara signifikan”. Hal tersebut dibuktikan dengan kenyataan bahwa rasio deformasi plastis (ω_{p1}/ω_{p2}) mengecil dengan kenaikan rasio radius (R_1/R_2) benda. Benda dengan radius lebih besar terdeformasi plastis lebih sedikit daripada benda dengan radius lebih kecil.

Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa pernyataan Jamari dapat diterima, terbukti dari hasil penelitian yang penulis lakukan ini sama dengan hasil penelitiannya, yakni rasio deformasi plastis semakin rendah ketika rasio radius benda kontak meningkat.

6.1.3 Hubungan Antara Rasio Deformasi dengan Rasio Radius Spesimen

Berdasar hasil penelitian penulis, dapat dinyatakan bahwa rasio deformasi plastis semakin rendah ketika rasio radius benda kontak meningkat, dan penurunan rasio deformasi tersebut tidak linier.

6.2 Saran

Perlu dilakukan penelitian seperti ini dengan menggunakan variasi pasangan spesimen yang memiliki rasio radius spesimen lebih besar lagi ($R_1/R_2 = 1$ hingga $R_1/R_2 > 7$), sehingga diperoleh gambaran kurva penurunan rasio deformasi plastis tersebut menuju ke arah asimtot terhadap rasio radius spesimen atau tidak.

DAFTAR PUBLIKASI

B.S. Hardjuno, J.D. Setiawan, R. Ismail dan Jamari. (2010) “ Pengukuran Deformasi Plastis pada Kontak Antar *Hemisphere*” *Prosiding seminar nasional sains dan teknologi 2010*, Wahid Hasyim University Press **Juni** 2010 hal. D.7-D.13

B.S. Hardjuno, J.D. Setiawan, R. Ismail dan Jamari. (2010) “Pengaruh ukuran geometri terhadap deformasi plastis pada kontak dua benda,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Semarang – ISSN 1411.6863, (*submitted*).

B.S. Hardjuno, J.D. Setiawan, R. Ismail dan Jamari. (2010) “Pengaruh pelumasan terhadap deformasi plastis pada kontak dua benda,” *Majalah Ilmiah Momentum FT. Unwahas* – ISSN 0216.7395, (*submitted*).

B.S. Hardjuno, J.D. Setiawan, R. Ismail dan Jamari. (2010) “Pengaruh harga beban normal terhadap deformasi plastis pada kontak dua benda,” *TEKNIS, Jurnal Teknologi, Sains dan Ekonomi Bisnis*, Politeknik Negeri Semarang – ISSN 1411.6863, (*submitted*).

DAFTAR PUSTAKA

- Abbott, E. J. and Firestone, F. A., (1933), "Specifying Surface Quality-A Method Based on Accurate Measurement and Comparison," *Mech. Eng. (Am.Soc. Mech. Eng.)* **55**, pp. 569
- Astakhov, V. P., (2007) "Editorial: Tribology at the Forefront of Study and Research on Metal Cutting," *Inst. J. Machining and Machinability of Material*. Vol. **2**, No.3, pp 309-315.
- Blau, P. J., (1989), *Friction and Wear Transitions of Materials*, Noyes, Park Ridge, NJ.
- Bower, A. F. and Johnson, K. L., (1991), "Plastic Flow and Shakedown of the Rail Surface in Repeated Wheel-Rail Contact," *Wear*, **114**, pp. 1–18.
- Chang, W. R., Etsion, I. and Bogy, D. B., (1988), "Static Friction Coefficient Model for Metallic Rough Surface," *ASME Journal of Tribology* **110**, pp. 57-63
- Chou, C. C. and Lin, F. J., (1997), "Tribological Effects of Roughness and Running-in on Oil-lubricated Line Contacts," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers part J Journal of Engineering Tribology* **211**, pp. 209 – 222.
- Dowson, D., (1998), *History of Tribology*, Second Edition, Professional Engineering Publishing, London.
- Hahn, G. T., and Huang, Q., (1986), "Rolling Contact Deformation of 1100 Aluminum Disks," *Metall. Trans. A*, **17A**, pp. 1561–1572.
- Jamari, (2006), *Running-in of Rolling Contacts*, Disertasi Program Doktor, University of Twente, The Netherlands.
- Jiang, Y., and Sehitoglu, H., (1996), "Rolling Contact Stress Analysis with the Application of a New Plasticity Model," *Wear*, **191**, pp. 35–44.
- Jiang, Y., Chang, J. and Xu, B., (2001), "Elastic-Plastic Finite Element Stress Analysis of Two-Dimensional Rolling Contact," *ASTM STP* **1339**, pp. 37–54.
- Johnson, K. L., (1987), *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Johnson, K.L. and Shercliff, H. R., (1992), "Shakedown of 2-Dimensional Asperities in Sliding Contact," *Int. Journal of Mech. Sciences* **34**, pp. 375 – 394.
- Kapoor, A. and Johnson, K.L., (1992), "Effect of Changes in Contact Geometry on Shakedown of Surfaces in Rolling/Sliding Contact," *Int. Journal of Mech. Sci.* **34**, pp. 223 – 239.

- Kogut, L. and Etsion I., (2002), "Elastic-Plastic Contact Analysis of a Sphere and a Rigid Flat," *ASME Journal of Applied Mechanics* **69**, pp. 657-662
- Kraghelsky, V., Dobychun, M.N. and Kombalov, V.S., (1982), *Friction and Wear Calculation Methods*, Pergamon Press, Oxford.
- Li, L.-Y., Wu, C.-Y., and Thornton, C., (2002), *A Theoretical Model for the Contact of Elastoplastic Bodies*, Proc. Instn. Mech. Engrs. **216** (Part C), pp. 421-431.
- Lin, Y. Y., and Hui, C. Y., (2002), "Mechanics of Contact and Adhesion Between Viscoelastic Spheres: An Analysis of Hysteresis During Loading and Unloading," *Journal of Polymer Science. Part B - Polymer Physics*, Vol. **40**, No. 9, pp. 772-793.
- Logan, D. L., (1992), *A first Course in the Finite Element Method*, second edition PWS-KENT Publishing Company, Rose Hulman Institute of Technology, Boston.
- Majumder, S., McGruer, N. E., Adams, G. G., Zavracky, A. P., Zavracky, P. M., Morrison R. H. and Krim, J., (2001), "Study of Contacts in an Electrostatically Actuated Microswitch," *Sensors and Actuators A*, **93**, pp. 19-26.
- Majumder, S., McGruer, N. E. and Adams, G. G., (2003), "Contact Resistance and Adhesion in a MEMS Microswitch," *Proceedings of STLE/ASME Joint International Tribology Conference, 2003-TRIB-270*, 2003, pp. 1-6.
- Mesarovic, S. D., and Johnson, K. L., (2000), "Adhesive Contact of Elastic-Plastic Spheres," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **48**(10), pp 2009-2033.
- Peng, W., and Bhushan, B., (2003), "Transient Analysis of Sliding Contact of Layered Elastic/Plastic Solids with Rough Surfaces," *Microsystem Technologies*, Vol. **9**, No. 5, pp. 340-345.
- Ponter, A. R. S., (1976), "A General Shakedown Theorem for Elastic-Plastic Bodies with Work Hardening," *3rd Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Tech.*, London.
- Rowe, G. W., Kalizer, H., Trmal, G. and Cotter, A., (1975), "Running-in of Plain Bearings," *Wear* **34**, pp. 1 – 14.
- So, H. and Lin, R. C., (1999), "The combined effects of ZDDP, "Surface Texture and Hardness on the Running-in of Ferrous Metals," *Tribology International* **32**, pp. 243 – 253.
- Summer-smith, J. D., (1994), *An Introductory Guide to Industrial Tribology*, Mechanical Engineering Publications Limited, London.
- Tabor, D., (1948), "A Simple Theory of Static and Dynamic Hardness," *Proceedings*, Royal Society, **A192**, pp. 247-274.

Vu-Quoc, L., Zhang, X., Lesburg, L., (2000), "A Normal Force-Displacement Model for Contacting Spheres Accounting for Plastic Deformation: Force-Driven Formulation," *J. Appl. Mech. Trans, ASME* **67** (2), 363–371.

Whitehouse, D. J., (1980), *The effect of surface topography on wear, Fundamentals of Tribology*, edited by Suh and Saka, MIT, pp. 17 – 52.

Whitehouse, D. J., (1994), *Handbook of Surface Metrology*, Institute of Physics Publishing.

Williams, J. A., (1994), *Engineering Tribology*, Oxford University Press.

Y. Kligerman, Y. Kadin, and I. Etsion, (2004), "Unloading of an Elastic-Plastic Loaded Spherical Contact," *AIMETA International Tribology Conference, September 14-17, Rome, Italy*.

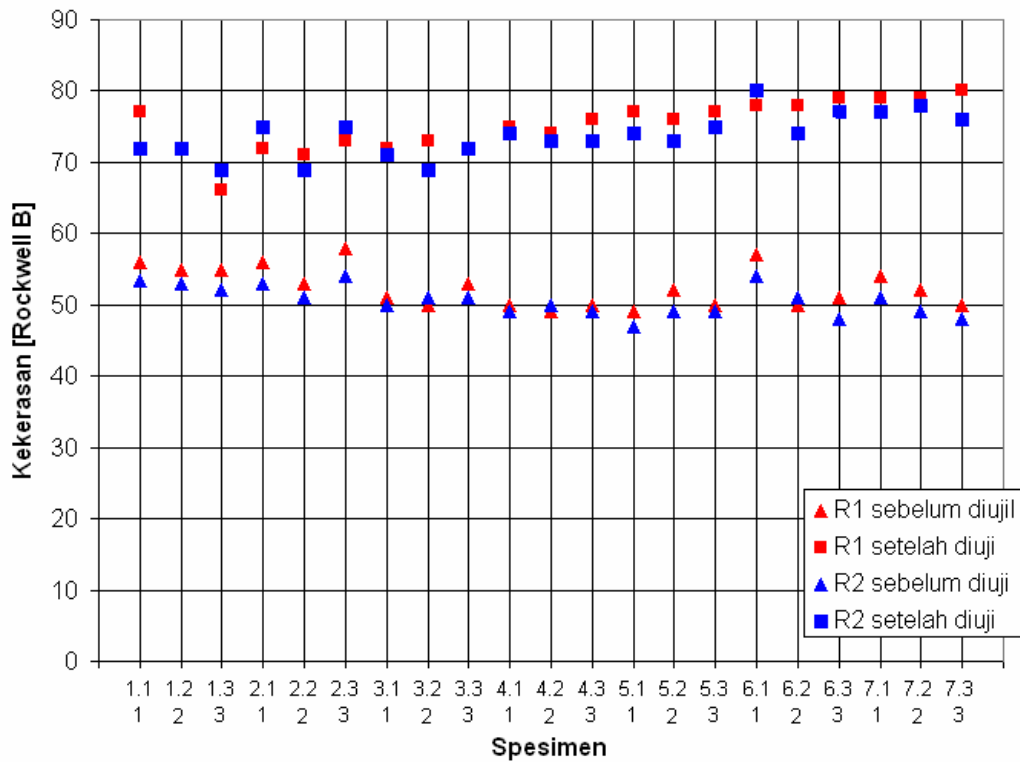
Yan, S. L., and Li, L. Y., (2003), "Finite Element Analysis of Cyclic Indentation of an Elastic- Perfectly Plastic Half-Space by a Rigid Sphere," *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. **217**, No. 5, pp. 505-514.

Ye, N., and Komvopoulos, K., (2001), "Effect of Residual Stress in Surface Layer on Contact Deformation of Elastic-Plastic Layered Media," *ASME Journal of Tribology*, Vol. **125**, No. 4, , pp. 692-699.

LAMPIRAN

Lampiran A: Kekerasan Spesimen

Kekerasan spesimen sebelum & setelah diuji					
Spesimen 1 (R1)			Spesimen 2 (R2)		
No	Sebelum	Setelah	No	Sebelum	Setelah
1.1	56	77	1	53,5	72
1.2	55	72	2	53	72
1.3	55	66	3	52	69
2.1	56	72	1	53	75
2.2	53	71	2	51	69
2.3	58	73	3	54	75
3.1	51	72	1	50	71
3.2	50	73	2	51	69
3.3	53	72	3	51	72
4.1	50	75	1	49	74
4.2	49	74	2	50	73
4.3	50	76	3	49	73
5.1	49	77	1	47	74
5.2	52	76	2	49	73
5.3	50	77	3	49	75
6.1	57	78	1	54	80
6.2	50	78	2	51	74
6.3	51	79	3	48	77
7.1	54	79	1	51	77
7.2	52	79	2	49	78
7.3	50	80	3	48	76



Lampiran B: Deformasi

Rezim kontak elastis plastis didefinisikan sebagai rezim di mana, berkaitan dengan kondisi kontak dengan beban, deformasi kontak asperiti tetap dalam kondisi di antara modulus deformasi elastis murni dan plastis penuh

Kogut, L. dan Etsion, I. (2002) menggunakan nilai K dari Chang dkk. (1988) dan interference kritis ω_{1-KE} didefinisikan:

$$\omega_{1-KE} = \left(\frac{\pi K_{KE} H}{2E} \right)^2 R \quad (1)$$

dimana

$$K_{KE} = 0,454 + 0,41\nu \quad (2)$$

Kogut, L. dan Etsion, I. (2002) menggunakan MEH yang meliputi perhitungan dari elastis ke dimulainya rezim kontak plastis penuh dari sebuah bola kontak dengan sebuah pelat kaku. Dalam model KE transisi kedua dari elastis-plastis ke rezim plastis-penuh ω_{2-KE} diajukan sebagai:

$$\omega_{2-KE} = 110\omega_{1-KE} \quad (3)$$

Menurut model ini tekanan kontak rata-rata p_{KE} dalam rezim elastis-plastis diperoleh dengan menggunakan kurva fitting dari hasil MEH dan dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{p_{KE}}{Y} = 1,19 \left(\frac{\omega}{\omega_{1-KE}} \right)^{0,289} \quad \text{untuk} \quad 1 \leq \frac{\omega}{\omega_{1-KE}} \leq 6 \quad (4)$$

$$\frac{p_{KE}}{Y} = 1,61 \left(\frac{\omega}{\omega_{1-KE}} \right)^{0,117} \quad \text{untuk} \quad 6 \leq \frac{\omega}{\omega_{1-KE}} \leq 110 \quad (5)$$

Besaran tak berdimensi beban kontak diperoleh secara empiris dengan menggunakan metode yang sama, yaitu perhitungan MEH. Hasil disajikan dalam persamaan di bawah:

$$\frac{P_{KE}}{P_{c-KE}} = 1,03 \left(\frac{\omega}{\omega_{1-KE}} \right)^{1,425} \quad \text{untuk} \quad 1 \leq \frac{\omega}{\omega_{1-KE}} \leq 6 \quad (6)$$

$$\frac{P_{KE}}{P_{c-KE}} = 1,40 \left(\frac{\omega}{\omega_{1-KE}} \right)^{1,263} \quad \text{untuk} \quad 6 \leq \frac{\omega}{\omega_{1-KE}} \leq 110 \quad (7)$$

dimana P_{c-KE} adalah beban kontak yang sesuai, persamaan $p_e = (4E/3)R^{0,5}\omega^{1,5}$ pada $\omega = \omega_{1-KE}$. Model KE tidak terbatas pada materi atau geometri tertentu dan berlaku sebagai solusi umum.

Jika beban dari kontak asperiti meningkat secara signifikan, sehingga deformasi menjadi *irreversible*, kontak beroperasi dalam rezim kontak plastis-penuh. Model dasar kontak plastis, yang dikenal sebagai model *profilometric* atau model permukaan *microgeometry*, diperkenalkan pada tahun 1933 oleh Abbott, E. J. dan Firestone, F. A. (1933) (AF model). Dalam model ini bidang kontak plastis A_{AF} permukaan kasar terhadap sebuah pelat kaku halus diasumsikan sama dengan persimpangan bidang datar dengan profil asperiti asli yang belum terdeformasi:

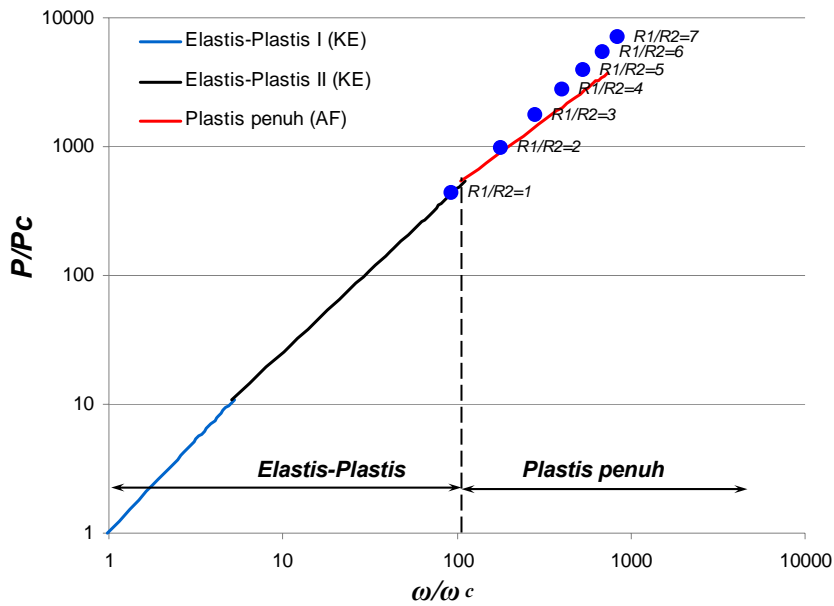
$$A_{AF} = 2\pi R\omega \quad (8)$$

Tekanan rata-rata di atas area kontak adalah tekanan aliran atau kekerasan indentasi H dan tetap konstan sehingga beban kontak P_{AF} adalah sama dengan bidang kontak dikalikan dengan tekanan kontak rata-rata, atau:

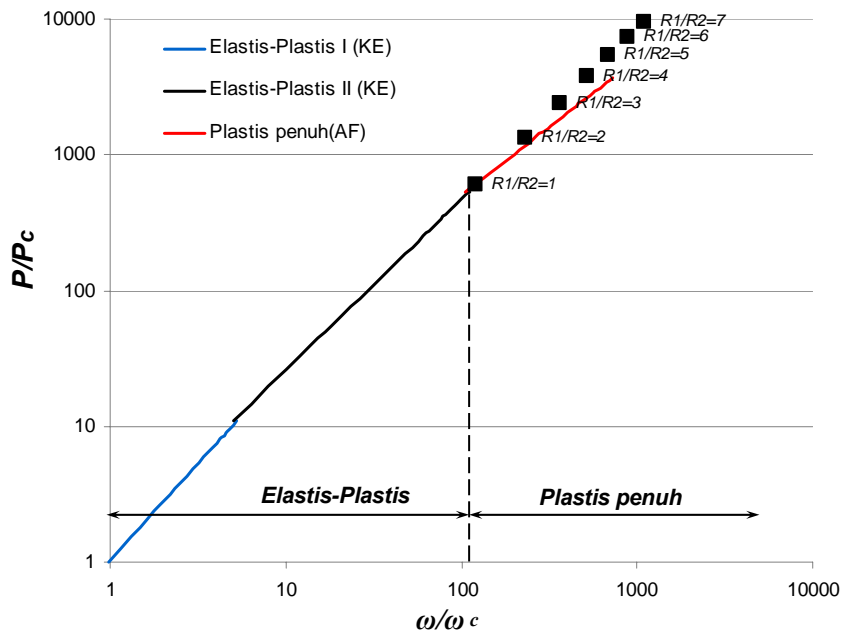
$$P_{AF} = 2\pi R\omega H \quad (9)$$

Menggunakan model Kogut, L. dan Etsion, I. (2002) serta Abbott, E. J. dan Firestone, F. A. (1933) digunakan untuk melihat deformasi yang terjadi pada masing-masing pasangan spesimen. Hasilnya dapat dilihat di bawah:

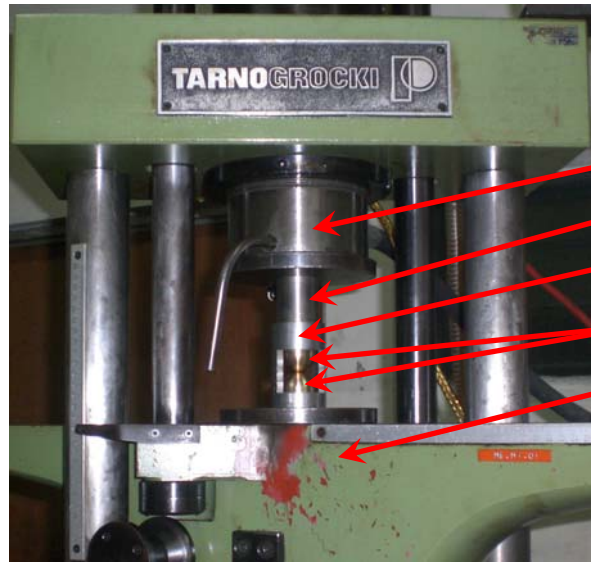
Grafik Rezim Deformasi untuk Beban 8000 N



Grafik Rezim Deformasi untuk Beban 11000 N



Lampiran C: Pemberian Beban/Penekanan Spesimen pada Mesin Uji Tekan.



Rahang tetap

Pemegang

Pengarah

Spesimen

Rahang gerak

Lampiran D: Tujuh macam pasangan spesimen (R_1/R_2).

