



UNIVERSITAS DIPONEGORO

**PENGARUH KOEFISIEN GESEK PADA KONTAK *ROLLING* ANTARA
SILINDER DAN *ROUGH SURFACE* MENGGUNAKAN METODE
ELEMEN HINGGA**

TUGAS AKHIR

**SURYA FITRIAWAN
L2E 306 036**

**FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
SEMARANG
OKTOBER 2011**

TUGAS SARJANA

Diberikan kepada:

Nama : Surya Fitriawan

NIM : L2E 306036

Pembimbing : Dr. Jamari, ST, MT

Jangka Waktu : 1 (satu) Semester

Judul : Pengaruh Koefisien Gesek Pada Kontak *Rolling* Antara Silinder Dan *Rough Surface* Menggunakan Metode Elemen Hingga.

Isi Tugas :

1. Memaparkan *rolling contact* antara silinder dan *rough surface* menggunakan model 2D.
2. Menganalisa tegangan von Mises dan tegangan geser Tresca pada kontak antara *silinder* dengan *flat* serta *rough surface* dengan disertai koefisien gesek.
3. Menganalisa *deformasi & residual stress* pada daerah kontak antara *silinder* dengan *rough surface* serta pengaruh *rolling contact* berulang (*repeated rolling contact*).

Dosen Pembimbing,



Dr. Jamari, ST, MT

NIP. 197 403 042 000 121 001

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

NAMA : Surya Fitriawan

NIM : L2E 306 036

Tanda Tangan : 

Tanggal : Oktober 2011





HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

NAMA : Surya Fitriawan
NIM : L2E 306 036
Jurusan/Program : Teknik Mesin
Studi
Judul Skripsi : Pengaruh Koefisien Gesek Pada Kontak
Rolling Antara Silinder Dan *Rough Surface*
Menggunakan Metode Elemen Hingga

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Tim Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.

TIM PENGUJI

Pembimbing I : Dr. Jamari, ST, MT ()
Penguji : Ir. Sudargana, MT ()
Penguji : Ir. Eflita Yohana, MT, PhD ()
Penguji : Ir. Sugiyanto, DEA ()

Semarang, Oktober 2011

Ketua
Jurusan Teknik Mesin,


Dr. Ir. Dipl Ing Berkah Fajar TK.

NIP. 195907221987031003

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

Sebagai sivitas akademika Universitas Diponegoro, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Surya Fitriawan
NIM : L2E 306 036
Jurusan/Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tugas Akhir

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Diponegoro **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*None-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

“Pengaruh Koefisien Gesek Pada Kontak *Rolling* Antara Silinder Dan *Rough Surface* Menggunakan Metode Elemen Hingga”

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Semarang
Pada Tanggal : 5 Oktober 2011

ABSTRAK

Hampir setiap benda yang kita jumpai bila dilihat pada skala mikro memiliki kontur permukaan yang tidak rata (*rough surface*), dan ilmu mekanika kontak merupakan ilmu yang membahas mekanisme kontak antara dua buah benda yang saling bersinggungan termasuk antar permukaan yang tidak rata. Penelitian ini menganalisa tentang kontak antara lingkaran dengan sebuah permukaan kasar. Sifat material yang digunakan pada pemodelan ini adalah elastis-plastis dengan *strain hardening* dan mengambil suatu kasus kontak statis antara *rigid indenter vs rough surface*. *Displacement (ω)* yang dikenakan pada *rigid indenter* yang kontak dengan *rough surface* yang disertai dengan koefisien gesek dan penekanan *rough surface* yang berulang-ulang merupakan parameter analisa dalam menentukan hasil simulasi.

Model pendekatan yang dilakukan menggunakan *commercial finite element software ABAQUS 6.10* disajikan dalam Tugas Akhir ini. Pemodelan dan prosedur simulasi telah diusulkan kemudian mengamati *present model* dengan semua fenomena yang terjadi.

Pemodelan *rolling contact* yang membandingkan antara *friction & frictionless* menunjukkan hasil bahwa permukaan *asperity* yang memiliki nilai *friction* lebih ‘mampu’ mempertahankan bentuk simetris sesuai besar variasi nilai koefisien geseknya. Semakin besar nilai koefisien gesek maka semakin besar *asperity* mempertahankan bentuknya saat *rolling contact* terjadi.

Kata kunci: *rolling*, permukaan kasar, elastis plastis, kontak berulang

ABSTRACT

Almost every object we encounter when viewed on a micro scale has an uneven surface contours (rough surface), and contact mechanics is a science that addresses the mechanism of contact between two objects intersect each other, including inter uneven surfaces. This study analyzed the contacts between the circles with a rough surface. Material properties used in this modeling is the elastic-plastic with strain hardening and taking a case of static contact between a rigid indenter vs. rough surface. Displacement (ω) imposed on the rigid indenter in contact with a rough surface that is accompanied by the coefficient of friction and rough surface pressure of repeated analysis of a parameter in determining the simulation results.

The model approaches were performed using commercial finite element software ABAQUS 6.10 presented in this Final. Modeling and simulation procedures have been proposed and then observe the present model with all the phenomena that occur.

Modeling of rolling contact between the friction & comparing the results show that frictionless surface asperity friction which has a value of more 'able' to maintain a symmetrical shape corresponding coefficient of variation values geseknya. The larger the value of the coefficient of friction, the greater asperity maintain its shape during rolling contact occurs.

Key words: rolling, rough surfaces, elastic plastic, repeated contact

HALAMAN PERSEMBAHAN

Tugas Akhir ini saya persembahkan untuk:

- ❖ (Alm) Ibu dan Bapak tercinta yang selalu memberikan do'a serta dukungan baik moril maupun material.
- ❖ Kakak-kakakku yang selalu memberikan dukungan.

KATA PENGANTAR

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat melewati masa studi dan menyelesaikan Tugas Akhir yang merupakan tahap akhir dari proses untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Mesin di Universitas Diponegoro.

Keberhasilan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan orang-orang yang dengan segenap hati memberikan bantuan, bimbingan dan dukungan, baik moral maupun material. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Jamari, ST, MT selaku dosen pembimbing Tugas Sarjana.
2. Rifky Ismail, ST, MT selaku dan M. Tauviquirrahman, ST, MT selaku dosen pada LAB. EDT.
3. Semua pihak yang telah membantu sampai terselesaikannya laporan Tugas Akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu atas segala kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan laporan Tugas Akhir ini, dan semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Semarang, Oktober 2011



Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN TUGAS SARJANA.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
HALAMAN ABSTRAK.....	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
NOMENKLATUR.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan Penulisan.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Metodologi Penelitian.....	3
1.5. Sistematika Penulisan.....	4
BAB II <i>ROLLING CONTACT</i>	
2.1. Teori <i>Hertzian Contact</i>	5
2.2. Teori <i>Rolling Contact</i>	8
2.3. Kontak <i>Sliding (Sliding Contact)</i>	9
2.4. Kontak Elastis-Plastis.....	10
2.5. Gesekan.....	11
2.6. Teori <i>Repeated Rolling Contact</i>	12
2.7. Teori Kegagalan Tresca.....	13

BAB III	PEMODELAN DENGAN METODE ELEMEN HINGGA	
3.1.	Teori Dasar FEM.....	15
3.2.	Spesifikasi Masalah	17
3.3.	Proses Pemodelan dan Simulasi	18
3.3.1	Pembuatan Model	19
3.3.2	Penentuan Material dan Sifatnya	19
3.3.3	Penentuan <i>Section Manager</i>	20
3.3.4	Penentuan <i>Section Assignment Manager</i>	20
3.3.5	<i>Assembly Part</i>	21
3.3.6	Penentuan Jumlah Step dalam proses simulasi.....	21
3.3.7	Penentuan Kontak dan Target Permukaan.....	22
3.3.8	Pembebanan.....	23
3.3.9	<i>Meshing</i>	24
3.3.10	Penentuan <i>Element Type</i>	25
3.3.11	<i>Job Manager</i>	25
3.4.	Prosedur Simulasi <i>Rolling Contact</i>	26
BAB IV	HASIL DAN ANALISA	
4.1	Efek Koefisien Gesek terhadap <i>Residual Stress</i>	28
4.2	Efek Koefisien Gesek pada Topografi Permukaan	31
4.3	Efek <i>Repeated Rolling Contact</i>	31
4.4	Efek Koefisien Gesek terhadap Tegangan Geser Maksimum (Tresca)	38
4.4.1	<i>Loading</i>	39
4.4.2	<i>Unloading</i>	39
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1	Kesimpulan	42
5.2	Saran.....	42
DAFTAR PUSTAKA	43

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Contoh komponen-komponen mesin yang saling kontak	1
Gambar 1.2	<i>Flow chart</i> penelitian	3
Gambar 2.1	Pemodelan <i>point contact</i> antara <i>sphere vs sphere</i>	6
Gambar 2.2	Pemodelan line contact antara silinder vs silinder	7
Gambar 2.3	Skema kontak <i>sliding</i>	10
Gambar 2.4	<i>Sliding</i> antara dua benda elastis dengan benda permukaan bergelombang	12
Gambar 2.5	Diagram Tegangan Geser.....	13
Gambar 2.6	Tegangan Geser pada Baut.....	14
Gambar 3.1	Pemodelan dengan <i>Finite Element Methods</i>	15
Gambar 3.2	Tipe <i>Finite Element</i>	16
Gambar 3.3	Pemodelan <i>rolling</i> elastis-plastis dengan gesekan	18
Gambar 3.4	<i>Plot</i> model	19
Gambar 3.5	<i>Plot</i> model material plastis.....	20
Gambar 3.6	<i>Plot section manager</i>	20
Gambar 3.7	<i>Plot section assignment manager</i>	21
Gambar 3.8	<i>Plot part assembly</i>	21
Gambar 3.9	<i>Plot step manager</i>	22
Gambar 3.10	<i>Plot interaction manager</i>	22
Gambar 3.11	<i>Plot constraint manager</i>	23
Gambar 3.12	<i>Plot load manager</i>	23
Gambar 3.13	<i>Plot boundary condition manager</i>	24
Gambar 3.14	<i>Plot mesh control</i> dan hasil <i>meshing</i>	24
Gambar 3.15	<i>Plot</i> penentuan <i>element type</i>	25
Gambar 3.16	<i>Plot job manager</i>	25
Gambar 3.17	<i>Indenter</i> menekan bidang <i>rough surface</i>	26
Gambar 3.18	<i>Rolling contact</i> dengan tetap menekan dari <i>indenter</i> terhadap bidang <i>rough surface</i>	26

Gambar 3.19	<i>Indenter</i> melepaskan tekanan terhadap bidang <i>rough surface</i> ...	27
Gambar 4.1	Posisi <i>indenter</i> untuk pengambilan data von Mises <i>unloading</i>	28
Gambar 4.2	von Mises <i>unloading</i>	29
Gambar 4.3	Tegangan von Mises saat <i>unloading</i> pada (a) $\mu = 0$; (b) $\mu = 0.2$; (c) $\mu = 0.4$; (d) $\mu = 0.6$	30
Gambar 4.4	Topografi permukaan	31
Gambar 4.5	Tresca $\mu = 0,2$ saat (a) <i>loading</i> ; (b) <i>unloading</i>	32
Gambar 4.6	Tresca $\mu = 0,4$ saat (a) <i>loading</i> ; (b) <i>unloading</i>	33
Gambar 4.7	Hasil tegangan Tresca $\mu = 0,2$ saat (a) <i>unloading</i> 1; (b) <i>unloading</i> 2; (c) <i>unloading</i> 3	34
Gambar 4.8	Hasil tegangan Tresca $\mu = 0,4$ saat (a) <i>unloading</i> 1; (b) <i>unloading</i> 2; (c) <i>unloading</i> 3	35
Gambar 4.9	Hasil tegangan Tresca $\mu = 0,2$ saat (a) <i>loading</i> 1; (b) <i>loading</i> 2; (c) <i>loading</i> 3	36
Gambar 4.10	Hasil tegangan Tresca $\mu = 0,4$ saat (a) <i>loading</i> 1; (b) <i>loading</i> 2; (c) <i>loading</i> 3	37
Gambar 4.11	Posisi <i>indenter</i> untuk pengambilan data <i>loading</i>	38
Gambar 4.12	Posisi <i>indenter</i> untuk pengambilan data <i>unloading</i>	38
Gambar 4.13	Tegangan geser Tresca saat <i>loading</i> pada (a) $\mu = 0$; (b) $\mu = 0.2$; (c) $\mu = 0.4$; (d) $\mu = 0.6$	40
Gambar 4.14	Tegangan geser Tresca saat <i>loading-unloading</i> pada (a) $\mu = 0$; (b) $\mu = 0.2$; (c) $\mu = 0.4$; (d) $\mu = 0.6$	41

NOMENKLATUR

Simbol	Keterangan	Satuan
a	Jari-jari lingkaran permukaan kontak	[mm]
A	Luas permukaan kontak	[mm ²]
E	Modulus elastisitas	[MPa]
E_1	Modulus elastisitas benda 1	[MPa]
E_2	Modulus elastisitas benda 2	[MPa]
E^*	Modulus efektif kontak	[MPa]
h	Jarak antara dua titik yang masing-masing titik terletak pada permukaan benda yang saling kontak	[mm]
N	Parameter <i>strain hardening</i>	[-]
P	Gaya kontak	[N]
P_m	Tekanan kontak rata-rata	[MPa]
p_1	<i>Pitch rough surface</i> benda 1	[mm]
p_2	<i>Pitch rough surface</i> benda 2	[mm]
R	Radius efektif kontak	[mm]
R_1	Radius benda 1	[mm]
R_2	Radius benda 2	[mm]
rp_r	Daerah plastis searah sumbu x	[mm ²]
rp_z	Daerah plastis searah sumbu y	[mm ²]
z	Ketinggian <i>asperity</i>	[mm]
ν	<i>Poisson's ratio</i>	[-]
ω	<i>Interference</i>	[mm]
ω_a	<i>Asperity displacement</i>	[mm]
ω_b	<i>Bulk displacement</i>	[mm]
σ	<i>Current stress</i>	[MPa]
σ_o	<i>Yield stress</i>	[MPa]

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada hampir semua proses dan peralatan mekanik terutama saat komponennya bekerja, terjadi kontak satu sama lain yang dapat berupa kontak statis (*static contact*), *sliding contact*, atau *rolling contact*. Kontak yang terjadi dapat berupa kontak elastis, elastis plastis dan *fully* plastis. Permodelan elastis-plastis merupakan hal yang penting dalam aplikasi keteknikan (*engineering application*) dan mekanika kontak. Dalam skala kecil kita dapat mengetahui bahwa *asperity* terdeformasi secara elastis-plastis selama terjadi kontak atau ketika dua permukaan benda ditekan bersamaan. Dalam skala besar, informasi ini mungkin berguna dalam menganalisa gesekan (*friction*) dan keausan (*wear*).

Ilmu mekanika kontak (*contact mechanics*) merupakan bagian dari ilmu tribologi yang diantaranya mengenai deformasi dan tegangan dua benda yang bersinggungan satu sama lain. Kontak yang terjadi antara dua benda dapat berupa titik (*point*), garis (*line*) ataupun permukaan (*surface*). Jika kontak yang terjadi diteruskan dengan dikenai suatu beban kontak, maka kontak yang awalnya berupa suatu titik dapat berubah menjadi suatu luasan tertentu.



a



b

Gambar 1.1 Contoh komponen-komponen mesin yang saling kontak (a) *Oil pump*, (b). Roda kereta dengan rel [14].

Banyak teori tentang analisa kontak yang telah dibahas dalam beberapa penelitian salah satunya teori Hertz [1] yang membahas tentang kontak elastis. Salah satu model awal tentang kontak elastis telah dikembangkan oleh Greenwood dan Williamson [2] pada tahun 1966. Pada tahun 2002 L. Kogut dan Etsion [3] menganalisa model kontak dalam rejim elastis-plastis antara bola dengan plat kaku menggunakan metode elemen hingga. Kemudian teori kontak elastis untuk bentuk *ellipsoid* dibangun berdasar metode analitik oleh Jamari dan Schipper (*JS model*) [4] pada tahun 2006 mengacu pada teori Hertz. Untuk geometri silinder, Green memodelkan kontak elastis-plastis secara statis.

Pada penelitian ini diambil suatu kasus kontak yaitu *rolling contact* disimulasikan dengan gerak *rolling* suatu silinder pada *rough surface*. Analisis ini disuguhkan dengan kontak antara silinder rigid dengan *rough surface* yang diasumsikan memiliki sifat material elastis-plastis. Beban yang dikenakan pada kedua benda saling kontak berupa gaya tekan dan *rolling*. Parameter analisa untuk menentukan tegangan geser Tresca, tegangan *von Mises*, tegangan sisa (*residual stress*) serta permukaan kontak yang terjadi pada hasil pemodelan yang dilakukan. Pada analisa kontak elastis-plastis menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software ABAQUS 6.10* yang merupakan salah satu *software* metode elemen hingga yang banyak digunakan.

1.2. Tujuan Penulisan

Tujuan penulisan Tugas Akhir ini adalah:

1. Menganalisa *rolling contact* untuk silinder dan *rough surface* menggunakan simulasi *software* dengan model 2D.
2. Menganalisa tegangan von Mises dan tegangan geser Tresca pada kontak antara *silinder* dengan *flat* serta *rough surface* dengan disertai koefisien gesek.
3. Menganalisa *deformasi & residual stress* pada daerah kontak antara *silinder* dengan *rough surface*.

4. Menganalisa pengaruh *rolling contact* berulang (*repeated rolling contact*).

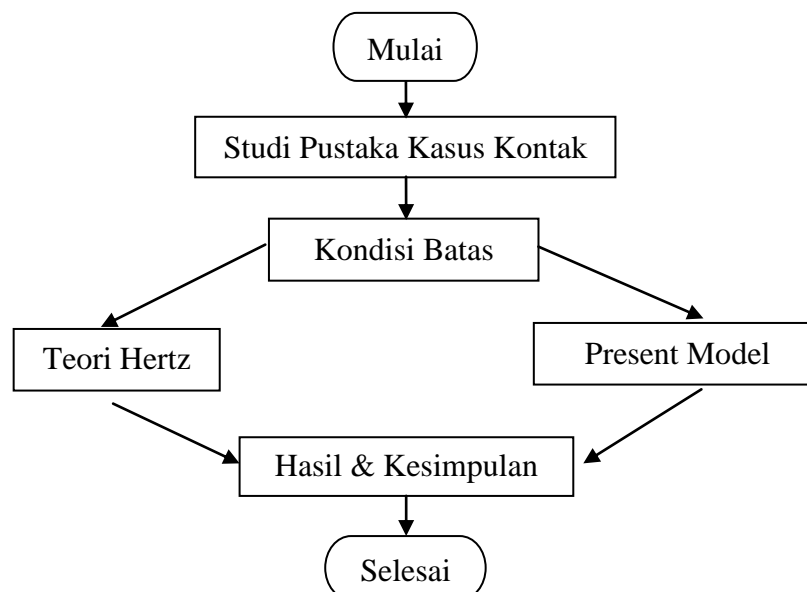
1.3. Pembatasan Masalah

Beberapa batasan masalah yang diambil pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Pemodelan elemen hingga menggunakan *Software ABAQUS 6.10*.
2. Sifat material alimuminium elastis-plastis dengan modulus elastisitas (E) = 70 GPa, *Poisson's ratio* (ν) = 0.33.
3. Kedua permukaan saling bergesekan dengan koefisien gesek (μ) = 0; 0.2; 0.4; 0.6.
4. Material plastis yang dipakai adalah alimuminium.
5. Tidak ada pelumasan.
6. Efek panas akibat gesekan diabaikan.
7. Geometri yang saling bersinggungan berbeda radius (radius silinder *indenter* 4.76 mm; radius *asperity* pada *rough surface* 0.24 mm).
8. Jenis kontak yang digunakan adalah kontak garis (*line contact*)

1.4. Metodologi Penelitian

Metode penelitian yang digunakan penulis dalam penulisan tugas akhir adalah:



Gambar 1.2 *Flow chart* penelitian

Pada Gambar 1.2 Penelitian dimulai dari memodelkan bentuk serta sifat-sifat material berdasarkan literatur dengan menggunakan *Software* ABAQUS 6.10. Selanjutnya hasil simulasi dianalisa dengan teori yang ada dan membandingkannya dengan data pustaka.

Pembahasan dilakukan guna menganalisa hasil simulasi yang telah dilakukan dan dikonsultasikan dengan pembimbing dan juga pihak-pihak lain yang terkait di bidang analisa keausan. Dari hasil pembahasan maka dapat ditarik kesimpulan yang bersifat membangun dan menyempurnakan metode-metode kontak pada *rough surface* dengan material aluminium alloy dengan sifat *elastic-plastic* dengan *strain hardening*.

1.5. Sistematika Penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang masalah, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metode penulisan dan sistematika penulisan.

BAB II *ROLLING CONTACT*

Berisi tentang perkembangan teori Hertz dan *Rolling Contact* beserta teori, fenomena dan ringkasan rumus mengenai *Rolling Contact*. Ringkasan teori *Repeated Rolling Contact*.

BAB III PEMODELAN DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Berisi tentang spesifikasi masalah, proses awal pemodelan, solusi dan hasil dari pemodelan dengan *Software* ABAQUS 6.10.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

Berisi tentang hasil dan analisa dari pemodelan *rolling contact* yang dilakukan, analisa bentuk deformasi serta tekanan yang terjadi pada kondisi kontak dan pengaruh variabel koefisien gesek.

BAB V PENUTUP

Berisi tentang kesimpulan dan saran mengenai tugas akhir

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BAB II

ROLLING CONTACT

2.1. Teori *Hertzian Contact*

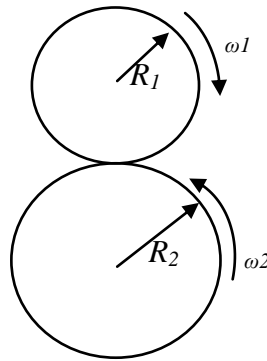
Hampir setiap permukaan dapat dipastikan menerima beban kontak, dimana tegangan paling besar terdapat pada area titik atau permukaan tertentu. Jenis konfigurasi pembebanan pada batas elastis dinamakan *Hertzian contact*. Kita mengetahui bahwa ketika dua permukaan yang terkena kontak, terdapat tekanan yang terbentuk pada suatu titik maupun garis. Kita dapat melihat "titik" atau "garis" kontak pada permukaan lengkung saat kontak keduanya mempunyai gerakan memutar. Kondisi ini akan muncul seperti halnya roda bertemu dengan suatu permukaan dan bagian yang saling kontak pada roda gigi transmisi. Apabila terjadi dengan kondisi elastis semua fenomena ini dapat dihitung menggunakan perumusan Hertz, karenanya dapat dinamakan *Hertzian contact*.

Saat dua permukaan benda, ditekan dan diberi beban bersama-sama dan diamati dengan skala mikron maka akan terbentuk deformasi pada kedua permukaan tersebut. Dengan pengamatan skala mikron setiap benda memiliki kekasaran permukaan, sehingga kontak aktual terjadi pada *asperities* dari kedua permukaan benda tersebut. Berdasarkan beban yang diberikan terhadap *asperities* dan sifat materialnya, *asperities* akan mengalami deformasi elastis, elastis-plastis, atau *fully* plastis. Penelitian dengan kondisi statis mulai dilakukan oleh Hertz. Teori Hertz [1] membahas tentang kontak elastis. Hertz memperkenalkan *interference ω* sebagai variabel untuk mengetahui deformasi elastis. Berikutnya diikuti oleh Greenwood dan Williamson [2] yang mengembangkan teori Hertz. Teori Hertz ini menjadi dasar untuk menganalisa kontak mekanik, dimana *asperities* terdeformasi secara elastis.

Secara sederhana mekanika kontak (*contact mechanics*) mempelajari tentang kontak yang terjadi antar benda, yang merupakan bagian dari ilmu tribologi. Lebih rinci bahwa *contact mechanics* diantaranya mempelajari tentang tegangan dan deformasi yang ditimbulkan saat dua permukaan *solid*

bodies saling bersentuhan satu sama lain pada satu titik atau lebih (*contact*), dimana gerakan kedua benda atau lebih dibatasi oleh suatu *constraint*. Kontak yang terjadi antara dua benda dapat berupa titik (*point*), garis (*line*) ataupun permukaan (*surface*). Jika kontak yang terjadi diteruskan dan dikenai suatu beban kontak, maka kontak yang awalnya berupa suatu titik dapat berubah menjadi bentuk ataupun permukaan yang lain tergantung besar tegangan yang terjadi saat kontak.

Sebagai contoh dari *point contact* adalah kontak yang terjadi antara dua *hemisphere*, digambarkan pada Gambar 2 :



Gambar 2.1 Pemodelan *point contact* antara *sphere vs sphere*[1]

Perhitungan radius, a , pada area kontak dirumuskan dengan:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3F}{8} \frac{\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}}} \quad (2.1)$$

Perhitungan radius efektif dan modulus kontak efektif dirumuskan dengan:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{E} = \left[\frac{(1-\nu_1)}{E_1} \right] + \left[\frac{(1-\nu_2)}{E_2} \right] \quad (2.3)$$

Dimana R_1 dan R_2 adalah jari-jari dari dua silinder yang saling kontak dan modulus elastisitas masing-masing E_1 dan E_2 dengan *Poisson's ratio* ν_1 dan ν_2 . Tekanan maksimum yang dijelaskan pada teori Hertz terjadi di pusat kontak, dapat dirumuskan dengan:

$$p_{\max} = \frac{3 F}{2\pi a^2} \quad (2.4)$$

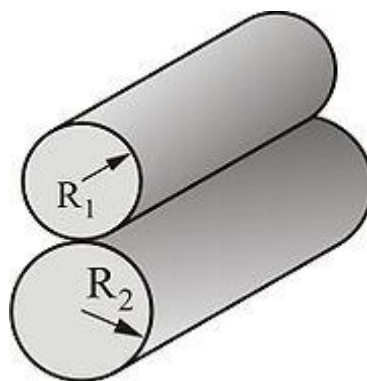
Tekanan rata-rata terjadi pada area:

$$p_{\text{avg}} = \left(\frac{2}{3}\right) p_{\max} \quad (2.5)$$

Defleksi maksimum berdasarkan teori Hertz dapat dirumuskan dengan:

$$\delta_{\max} = \frac{a^2}{r} \quad (2.6)$$

Selain pada kasus point contact, Hertz juga memodelkan untuk kasus pemodelan *line contact*, terlihat pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 Pemodelan line contact antara silinder vs silinder [1]

Perhitungan radius, b , pada area kontak dirumuskan dengan:

$$b = \sqrt{\frac{2F}{\pi l} \frac{\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}}} \quad (2.7)$$

Tekanan maksimum yang dijelaskan pada teori Hertz dapat dirumuskan dengan:

$$P_{max} = \frac{2F}{\pi b l} \quad (2.8)$$

Tekanan rata-rata terjadi pada area:

$$P_{avg} = \left(\frac{\pi}{4}\right) P_{max} \quad (2.9)$$

Tegangan geser maksimum terjadi pada pusat kontak area dimana $z = 0.79a$ dan juga $\tau_{max} \approx (1/3) P_{max}$.

2.2. Teori *Rolling Contact*

Teori sederhana *rolling contact* merupakan hubungan antara *displacement* tangensial permukaan dari suatu benda dan traksi permukaan tangensial pada benda. Seperti pada permasalahan kontak roda dengan rel, dan masih banyak permasalahan dimana *rolling* maupun *rolling* dengan *sliding* kita jumpai. Benda tersebut dibedakan dari satu sama lain dengan memasang angka satu dan angka dua. Kedua benda tersebut untuk sementara waktu diperlakukan sebagai *rigid* (kaku). Kedua benda tersebut ditekan bersama-sama sedemikian sehingga mereka menyentuh dalam suatu titik, kontak garis (*line contact*) akan mengikuti pergerakannya.

Kedua benda tersebut diputar, sedemikian sehingga titik kontak bergerak ke permukaan benda, kemudian ada dua berbagai kemungkinan

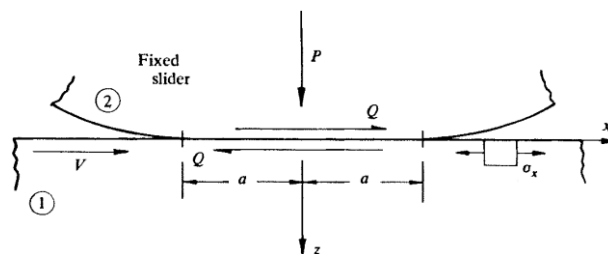
dimana kecepatan v_1 dari titik-kontak pada permukaan benda satu sama dengan kecepatan v_2 dari titik-kontak di atas permukaan benda dua, atau tidak. Dalam kasus ini (kecepatan yang sama) orang menyebutnya *rolling*, kemudian kasus tentang dorongan dinamakan *sliding*, atau *rolling* dengan *sliding*.

Pergerakan roda pada rel (atau *roller* pada lintasannya) sering kali mempunyai masalah dan karakter yang kompleks terdiri dari *rolling*, *sliding* pada arah longitudinal saat pengereman dan akselerasi, *sliding* arah transversal, dsb. Permasalahan ini diselesaikan dengan salah satu tujuannya untuk mengetahui distribusi tegangan sisa yang terjadi. Pada dekade masa lampau Kalker mengembangkan sejumlah teori kontak rel-roda yang dapat digunakan untuk menentukan gaya tangensial dan momen putaran antara roda dan rel. Teori ini adalah *Linear Theory*, *Simplified Theory*, *Empirical Theory*, *Exact Three Dimensional Rolling Contact Theory* dan *Strip Theory*. Teori ini berasumsi bahwa kontak antara kedua benda adalah *non-conformal*. Baru-baru ini, Kalker dan Li [5] memperkenalkan suatu pendekatan untuk solusi kuantitatif dari *conformal* yang menghubungkan antara roda dan rel.

2.3. Kontak (Contact) *Sliding*

Dalam hubungannya dengan pergerakan relatif pada permukaan (*relative motion of the surface*), jenis kontak permukaan yang terjadi dapat berupa *sliding*, *rolling*, dan *spinning*. *Sliding* adalah pergerakan benda dengan kecepatan relatif antara dua benda yang bersentuhan/kontak pada titik kontak O dalam bidang singgung (*tangent plane*) seperti terlihat dalam Gambar 2.3. *Sliding* merupakan salah satu fenomena penting dalam kontak tribologi selain *spinning* dan *rolling*, yang terjadi pada titik kontak antara dua permukaan yang bergerak secara relatif. Kecepatan *sliding* terdiri v_x dan v_y yang berturut-turut merupakan kecepatan dari permukaan benda ke arah sumbu x dan sumbu y terhadap titik kontakannya. Ketika *sliding*, terjadi gesekan yang disebabkan oleh kekasaran permukaan kontak antara dua benda serta dipengaruhi oleh gaya normal dan koefisien gesek. Oleh karena itu *sliding* antara dua benda dapat menyebabkan keausan pada permukaannya.

Gambar 2.3 Menunjukkan suatu *slider* yang memiliki profil lengkung bergerak dari kanan ke kiri di atas permukaan pelat. Titik kontak awal ditetapkan sebagai titik acuan dan permukaan pelat bergerak dari kiri ke kanan dengan kecepatan tetap arah sumbu x . Benda yang ditekan dengan gaya normal P dan mengabaikan gaya gesek, akan menghasilkan luas permukaan kontak yang dapat dihitung dengan teori Hertz. Dalam kenyataannya, pada saat gerakan *sliding*, gaya tangensial gesek Q terjadi pada masing-masing permukaan yang arahnya berlawanan dengan gerakan benda.



Gambar 2.3 Skema kontak *sliding*[4]

2.4. Kontak Elastis-Plastis

Berbagai model yang diuraikan pada penelitian dengan mengamati gejala tentang plastisitas suatu material. Dimana material bahan uji dengan *indenter* berbentuk bola dipertimbangkan untuk menjadi plastis dengan mempertimbangkan kondisi-kondisi sebagai berikut:

$$P_m \approx 3\sigma_o \text{ dan } \frac{E^*}{\sigma_o R_i} \approx 40 \quad (2.10)$$

Hubungan antara beban indentasi dan *displacement* di dalam material plastis adalah bersifat linier. Diasumsikan bahwa tekanan pada daerah plastis adalah $3\sigma_o$. hubungan *load-displacement* diberikan oleh Johnson [9] sebagai berikut:

$$\frac{P}{P_y} = 0.81 \left(\frac{h E^{*2}}{R_i \sigma_o^2} \right) = 5.5 \left(\frac{h}{h_y} \right) \quad (2.11)$$

dimana P_y dan h_y adalah tekanan dan kedalaman. Jari-jari kontak pada daerah plastis akan meningkat lebih cepat bila dibandingkan pada kasus elastis dinyatakan dalam:

$$a = \sqrt{2 R_i h} \quad (2.12)$$

2.5. Gesekan

Ketika kedua benda saling bersinggungan satu dengan yang lainnya, apabila diamati pergerakannya seperti dilawan oleh suatu gaya. Fenomena ini adalah gesekan (*friction*); sedangkan gaya yang bekerja di dalamnya disebut gaya gesek (*friction force*). Pada umumnya suatu gaya/ kekuatan penyeimbangan yang terbatas (*finite*) diperlukan untuk mengatur suatu benda *sliding*, sementara ini banyak orang mengadakan percobaan sisa gaya gesek konstan selama *sliding*.

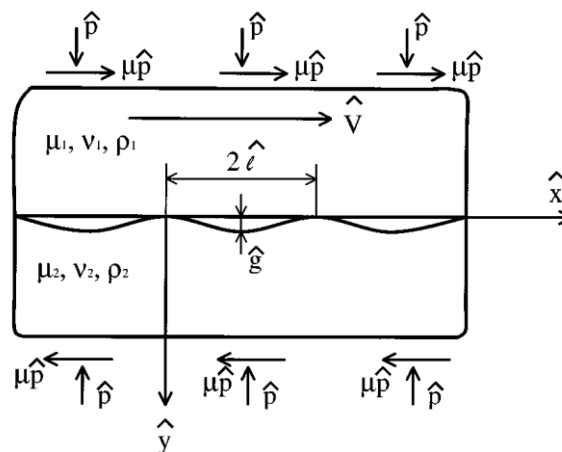
Gesekan adalah fenomena rumit yang melibatkan efek yang berbeda seperti deformasi elastis dan plastik dari bahan berhubungan, kekasaran permukaan dan kontaminasinya, lapisan batas, gaya *adhesiv*, dan gelombang elastis. Pengaruh gabungan dari semua efek ini hampir tidak dapat dihitung secara teoritis, sedangkan pengukuran eksperimental tidak dapat memisahkan efek ini. Akibatnya, ada sejumlah pendekatan untuk memahami masalah *sliding* kontak akibat gesekan benda yang *deformable*.

Dengan mempertimbangkan regangan geser bidang kontak gesekan dari dua benda elastis semiinfinite dengan kepadatan ρ_1 dan ρ_2 , salah satunya adalah datar dan yang lainnya yang memiliki permukaan sedikit bergelombang. Kedua benda ditekan bersama oleh \hat{p} traksi seragam normal dan *slide* dengan $\mu \hat{p}$ traksi tangensial di tak terhingga. Koefisien gesekan

kinetik antara kedua badan ini μ . Permukaan yang lebih rendah diasumsikan memiliki bentuk murni sinusoidal dengan periode $2\hat{l}$.

$$\hat{y} = \frac{\hat{g}}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi(\hat{x} + \hat{E})}{\hat{l}} \right)^{1/2} \quad (2.13)$$

di mana \hat{x} dan \hat{y} adalah koordinat melekat pada tubuh bagian bawah, \hat{g} adalah amplitudo puncak-ke-lembah permukaan *waviness* ($\hat{g} < \hat{l}$), dan \hat{E} akan ditentukan kemudian. Tubuh bagian atas bergerak ke kanan dengan kecepatan \hat{V} konstan.



Gambar 2.4 *Sliding* antara dua benda elastis dengan benda permukaan bergelombang[4]

2.6. Teori *Repeated Rolling Contact*

Pada saat ini perkembangan *rolling contact* menunjukkan beberapa kemajuan yang cukup signifikan dalam hal analisis tegangan dan regangan yang terjadi. Hanya ada dua jenis kondisi tegangan dan regangan yang dijelaskan secara detail pada sifat material elastis-plastis berkaitan dengan fenomena *repeated rolling contact*:

1. Material elastis, *quasiplastis*, analisis dua dimensi (*plane-strain*) yang dikembangkan oleh Merwin dan Johnson [6] , Johnson dan Jefferis [7].
2. Analisis metode elemen hingga material elastis-plastis tiga dimensi yang dikembangkan oleh Martin dan Hay [8].

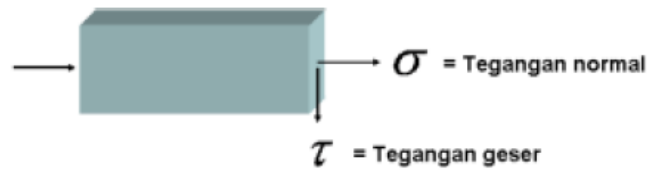
Kedua analisis di atas melakukan pemodelan dengan *rigid silinder* bergerak *rolling* pada *semi-infinite half plane*. Mereka mensimulasikan *rolling* dengan menggerakkan secara translasi distribusi *pressure* Hertzian sepanjang permukaan *semi-infinite half plane* dengan atau tanpa koefisien gesek. Untuk pergerakan tanpa koefisien gesek disebut dengan kondisi *frictionless*. Kedua analisis ini menganalisa tegangan *von Mises*, bentuk kontur serta besaran nilai tegangan yang terjadi pada *contact area*.

2.7. Teori Tresca

Tegangan geser merupakan tegangan yang bekerja sejajar atau menyinggung permukaan. Perjanjian tanda untuk tegangan geser sebagai berikut: Tegangan geser yang bekerja pada permukaan positif suatu elemen adalah positif apabila bekerja dalam arah positif dari salah satu sumbu-sumbu positif dan negatif apabila bekerja dalam arah negatif dari sumbu-sumbu. Tegangan geser yang bekerja pada permukaan negatif suatu elemen adalah positif apabila bekerja dalam arah negatif sumbu dan negatif apabila bekerja dalam arah positif.

Prinsip Tegangan Geser

Sifat-sifat suatu bahan dalam keadaan geser dapat ditentukan secara eksperimental dari uji-uji geser langsung (*direct shear*) atau puntiran (*torsion*). Uji-uji yang kemudian dilakukan dengan memuntir pipa-pipa berongga, sehingga menghasilkan suatu keadaan geser murni.



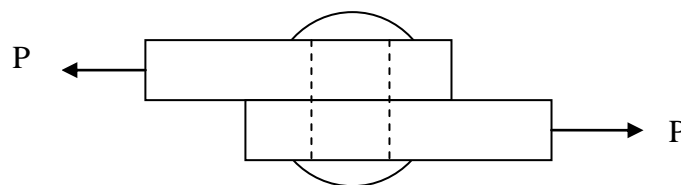
Gambar 2.5 Diagram Tegangan Geser

Sebagai suatu contoh dapat dilihat pada sambungan baut. Tegangan geser pada baut diciptakan oleh aksi langsung dari gaya-gaya yang mencoba mengiris bahan. Tegangan geser dapat diperoleh dengan membagi gaya geser terhadap luas.

$$\tau = \frac{F_s}{A} \quad (2.14)$$

dimana, τ = Tegangan Geser (Mpa)

A = Luas Bidang Geser



Gambar 2.6 Tegangan Geser pada Baut

Bagian awal dari diagram tegangan-regangan geser sebuah garis lurus, seperti dalam keadaan tarik. Untuk daerah elastis linier, tegangan geser berbanding lurus dengan regangan geser, jadi diperoleh persamaan berikut bagi hukum Hooke untuk keadaan geser.

$$\tau = G\gamma \quad (2.15)$$

dimana, τ = Tegangan geser (MPa)

G = Modulus geser (N/m²)

γ = Regangan geser (rad)

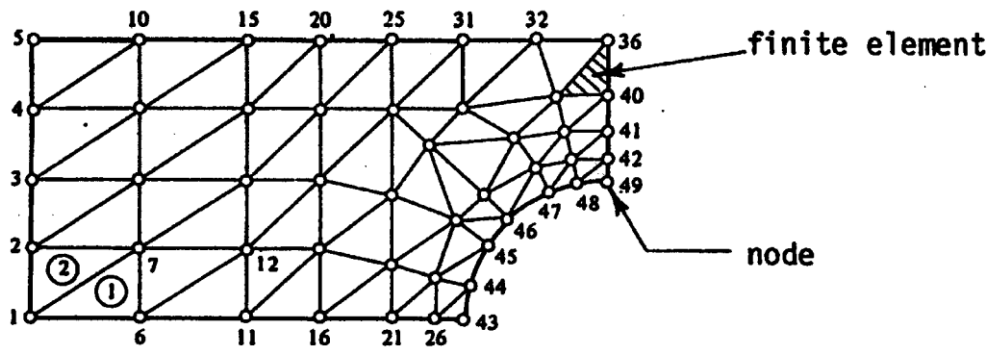
- Tegangan geser pada permukaan-permukaan yang berhadapan besarnya sama tapi arahnya berlawanan.
- Tegangan geser pada permukaan-permukaan yang saling tegak lurus besarnya sama tetapi memiliki arah-arah yang sedemikian rupa sehingga

BAB III

PEMODELAN DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

3.1 Teori Dasar FEM

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



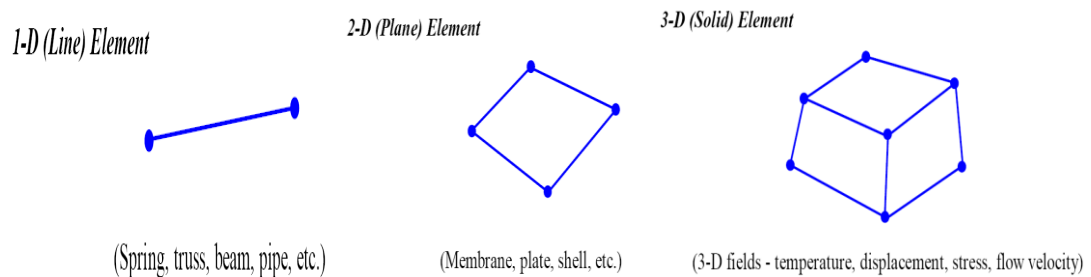
Gambar 3.1 Pemodelan dengan *Finite Element Methods*

Setiap node memiliki satu derajat kebebasan bila digeser sejauh U_1 dan U_2 . Persamaan yang menyatakan hubungan antara gaya yang bekerja pada node dan pergeseran yang diakibatkannya adalah sebagai berikut:

$$P_1 = k_{11}U_1 + k_{12}U_2 \quad (3.1)$$

$$P_2 = k_{11}U_1 + k_{12}U_2 \quad (3.2)$$

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



Gambar 3.2 Tipe *Finite Element*.

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

$$\{P\} = [K] \{U\} \quad (3.3)$$

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

$$\{\sigma\} = [D] [B] \{U\} \quad (3.4)$$

Bagian yang rumit dari penyelesaian elemen hingga adalah persiapan data masukan. Topologi jaringan elemen harus dilukiskan dalam program komputer dengan nomer elemen dan nomer node yang berhubungan dengan setiap elemen. Semua informasi ini disusun dalam table sangat rumit dan mudah membuat kesalahan terutama bila konstruksi terdiri dari ratusan node. Untunglah, perkembangan teknologi modern telah dapat mengatasi problema

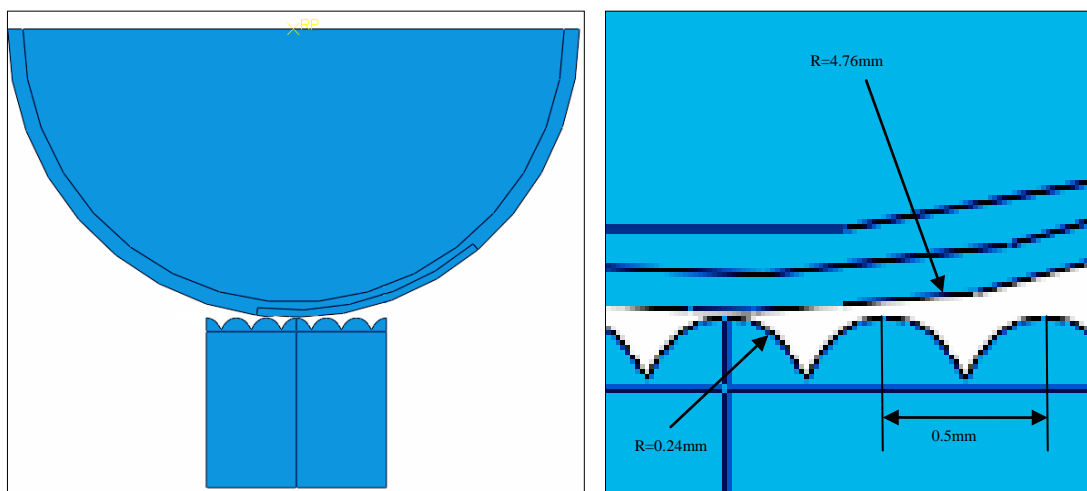
tersebut dan selama itu telah memperluas penggunaan metode elemen hingga. Prosesor awal memungkinkan ditindihkannya jaringan elemen pada gambar konstruksi dan koordinat node dan hubungan antar elemen dapat dimasukkan secara otomatis. Komputer pada proses lanjut menampilkan hasil analisa elemen hingga dalam bentuk Gambar, dengan demikian pemakai dengan cepat dan mudah mengevaluasi informasi tanpa harus menganalisa data cetak numeric yang tak terhitung jumlahnya.

Sistem *ABAQUS* meliputi *ABAQUS Standard* sebagai pendukung umum (*general-purpose*) program elemen hingga, *ABAQUS Explicit* sebagai *dynamic explicit* program elemen hingga dan visualisasi modul sebagai program *postprocessing* interaktif yang menyediakan tampilan dan daftar keluaran dari file *output data base* yang ditulis oleh *ABAQUS Standard* atau *ABAQUS Explicit*. Program *ABAQUS* bekerja berdasarkan teori dasar yang dikembangkan pada *Finite Element Methods (FEM)* yang kemudian ditransfer kedalam bahasa program menggunakan bahasa *FORTRAN* dan *C++* agar bias dibaca oleh perangkat lunak. *Software ABAQUS* menyediakan program yang digunakan untuk memodelkan benda yang akan dianalisis yang diberi nama *ABAQUS CAE*. Program ini berfungsi sebagai desain model yang akan kita analisa. *ABAQUS* juga memiliki fasilitas *CAD/CAM/CAE* yang bisa difungsikan sebagai Software gambar dan analisa elastis dan plastis. Keunggulan *ABAQUS* dibanding program lain sejenis adalah kelengkapan menu yang tersedia pada part module. Selain itu kita juga bias memasukkan data secara manual ke dalam input file. Pengembangan bahasa program di *ABAQUS* memungkinkan para desainer lebih mudah dalam memilih metode yang digunakan dalam melakukan proses simulasi dan analisa.

3.2 Spesifikasi Masalah

Pembahasan permasalahan ini bertujuan untuk menentukan pengaruh dari beberapa komponen dari pergerakan *rolling contact* pada distribusi tegangan sisa. Dasar dari pembahasan pemodelan dan permasalahan ini

mengacu pada jurnal [11]. Pemodelan ini menggunakan dua dimensi *rolling contact* dengan gesekan (*friction*) antara *silinder* elastis dan elastis-plastis *half space* pada kontak kedua benda. Dalam simulasi ini menggunakan modulus elastisitas E sebesar 70000Mpa, Koefisien gesek $\mu = 0; 0.2; 0.4; 0.6$. *Interference* ω sebesar 0.02mm serta pergerakan *rolling* mempunyai jarak sebesar 50 mm.



Gambar 3.3 Pemodelan *rolling* elastis-plastis dengan gesekan [11]

Tabel 3.1 Parameter simulasi *rolling contact*

Paramater	Keterangan
Material <i>Rough surface</i>	Alumunium
Material <i>Cilinder</i>	Rigid
Modulus Elastisitas (E)	70Gpa
<i>Poisson's Ratio</i> (ν)	0.33
Koefisien gesek (μ)	0.02; 0.04; 0.06
Yield Stress (γ)	270 MPA

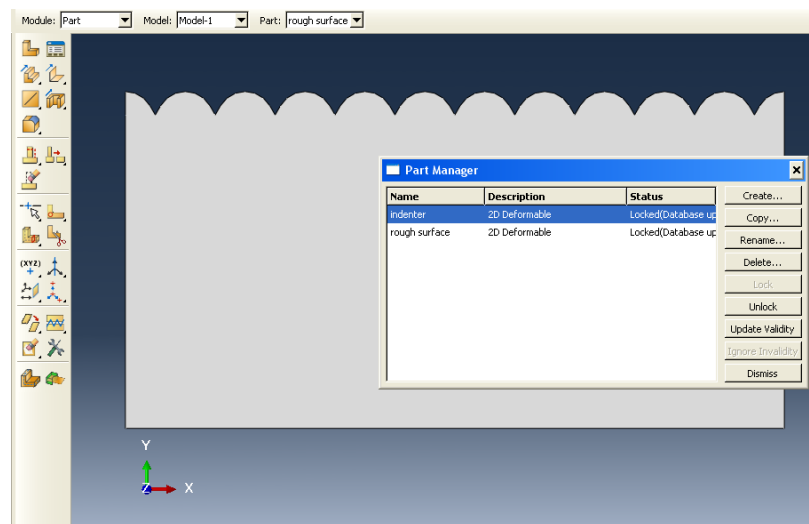
3.3 Proses Pemodelan dan Simulasi

Proses pemodelan terdiri dari pembuatan model, penentuan sifat material, *meshing*, serta penentuan kontak dan target permukaan. Proses simulasi meliputi penentuan kondisi batas mengenai pembebanan (*Define*

Loads) dan pemecahan masalah (*solving*) dengan menggunakan *software* ABAQUS 6.10.

3.3.1 Pembuatan Model

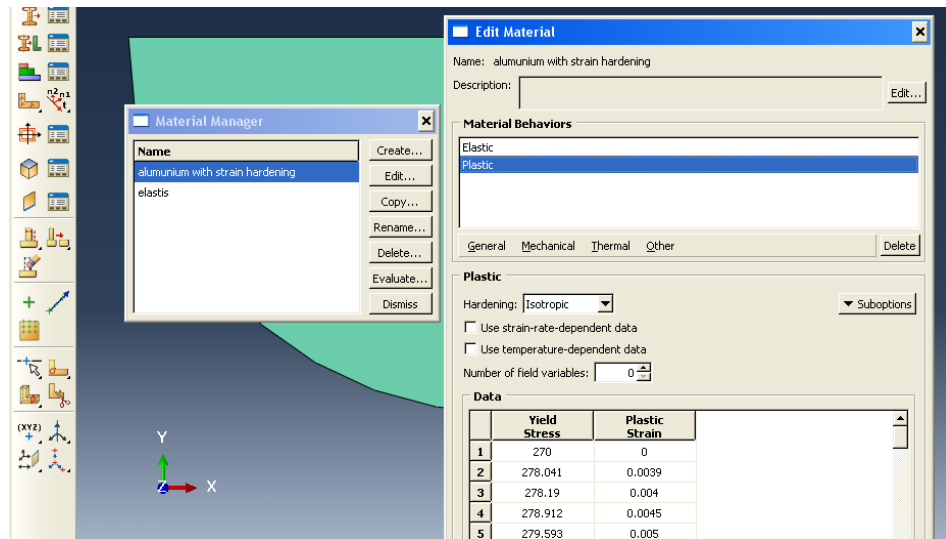
Pemodelan *present* model dilakukan dengan membuat *model part* seperti pada Gambar 3.1 dengan dimensi yang sudah ditentukan. Adapun langkah pembuatan *model part* di ABAQUS 6.10 *Module* yaitu dengan memilih *Module* > *Part* > *Create Part* > *Penentuan Modeling Space, Type, Base Feature*. Berikut pada gambar 3.4 memperlihatkan plot *model* dari *present* model yang dihasilkan:



Gambar 3.4 Plot model

3.3.2 Penentuan Material dan Sifatnya

Material yang digunakan adalah elastis-plastis. Langkah penentuan sifat material yaitu dari ABAQUS 6.10 *Module* pilih *Module* > *Property* > *Create Material*. Pada sifat elastis-plastis dilakukan perhitungan terlebih dahulu untuk mendapatkan nilai *yield stress* (S_y) dan regangan (*Strain*) sebagai input data pada *software* ABAQUS 6.10.

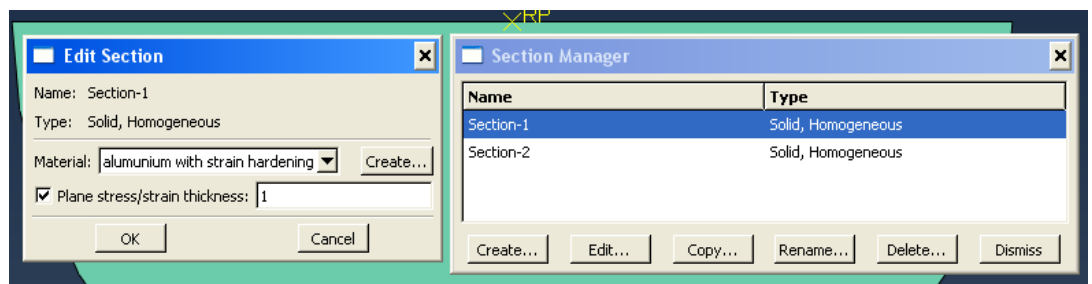


Gambar 3.5 Plot model material plastis

Pada model diketahui nilai *yield stress* material sebesar 70 GPa, kemudian dengan melakukan uji coba dan mengambil plot Gambar nilai material pada model didapatkan nilai elastis plastis yang di inputkan pada FEM.

3.3.3 Penentuan *Section Manager*

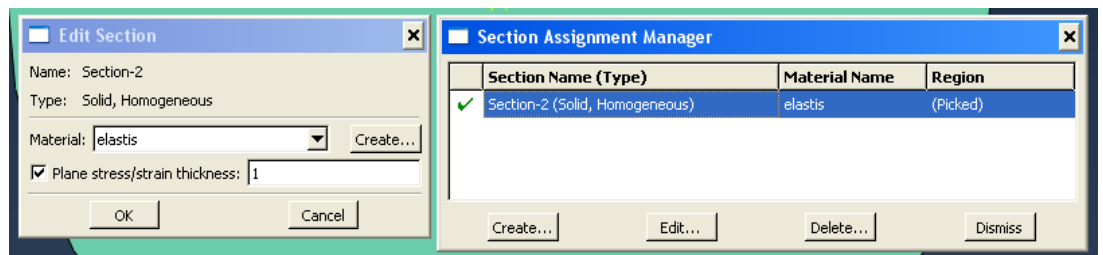
Langkah penentuan sifat material yaitu dari ABAQUS 6.10 Module pilih *Module > Property > Create Section*



Gambar 3.6 Plot *section manager*

3.3.4 Penentuan *Section Assignment Manager*

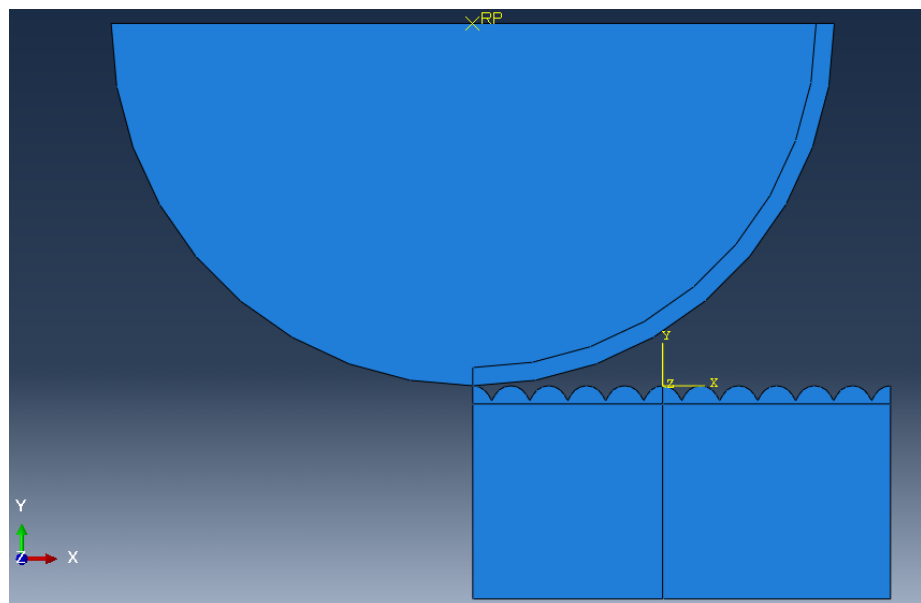
Langkah penentuan sifat material yaitu dari ABAQUS 6.10 Module pilih *Module > Property > Assign Section*



Gambar 3.7 Plot section assignment manager

3.3.5 Assembly Part

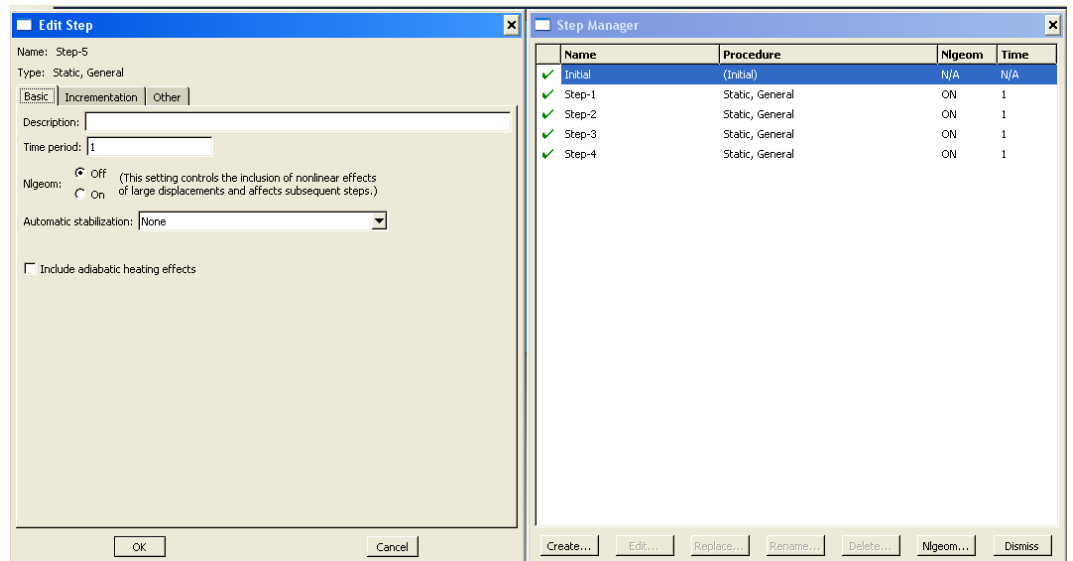
Langkah penggabungan kedua benda yaitu dari ABAQUS 6.10 Module pilih *Module > Assembly > Instance Part*



Gambar 3.8 Plot part assembly

3.3.6 Penentuan Jumlah Step dalam proses simulasi

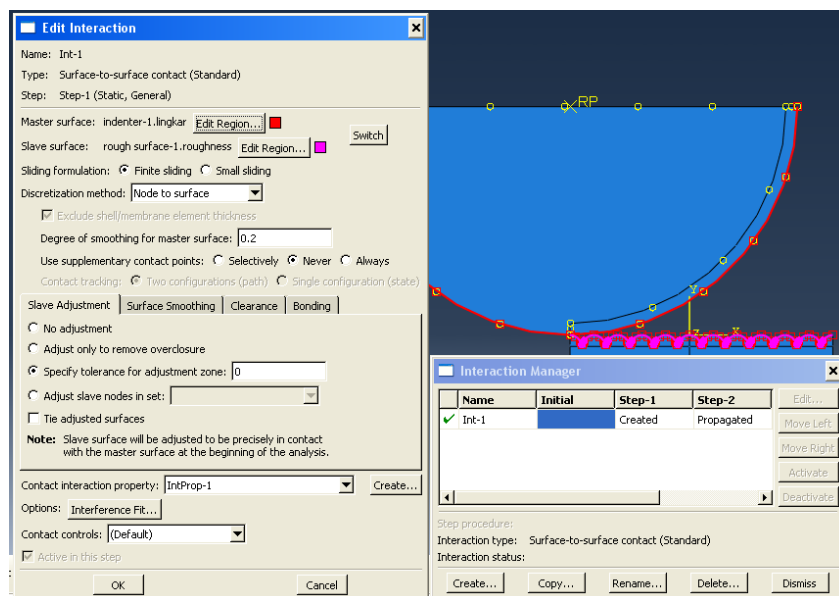
Langkah jumlah step dalam proses simulasi yaitu dari ABAQUS 6.10 Module pilih *Module > Step > Create Step*



Gambar 3.9 Plot step manager

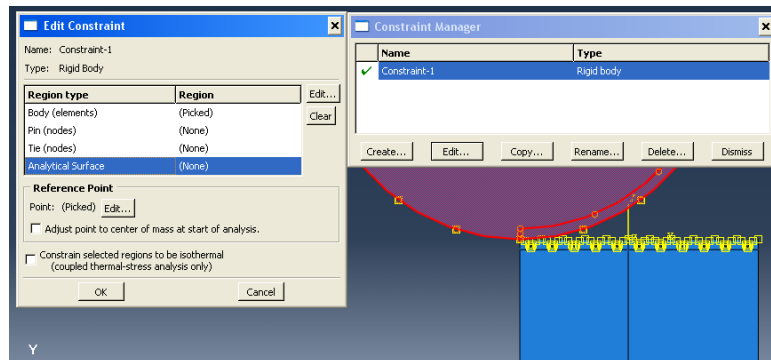
3.3.7 Penentuan Kontak dan Target Permukaan

Kontak pada *present* model ini ditentukan dengan menggunakan menu *Interaction*. Langkah penentuan kontak dan target permukaan yaitu dari ABAQUS 6.10 *Module* pilih *Module* > *Interaction* > *Create Interaction*.



Gambar 3.10 Plot interaction manager

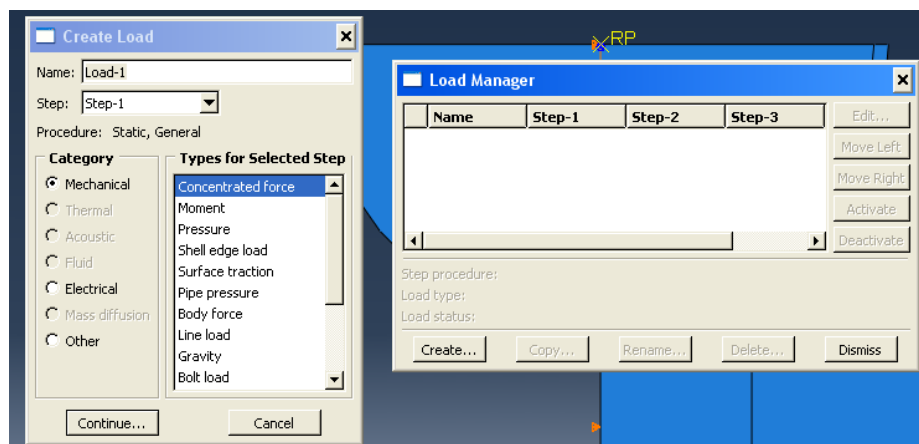
Selain itu juga dilakukan penentuan *constraint* manager berupa model coupling untuk memastikan pembebanan yang terjadi merata di atas permukaan sphere. Langkah penentuan constrain yaitu dari ABAQUS 6.10 Module pilih *Module > Interaction > Create Constrain*.



Gambar 3.11 Plot constraint manager

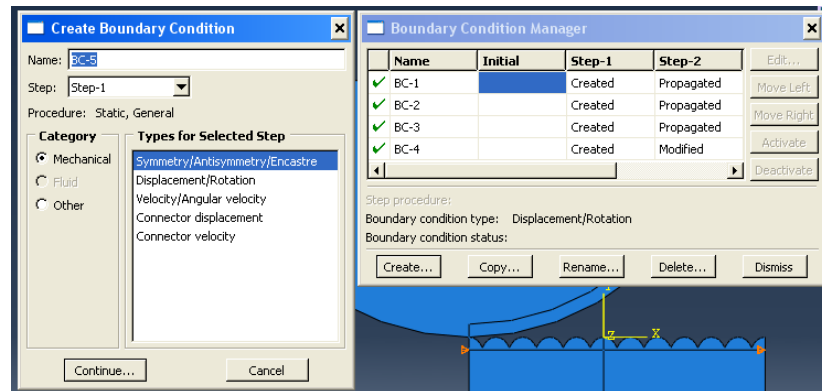
3.3.8 Pembebanan

Tujuan penentuan kondisi batas berupa pembebanan pada *present* model adalah agar beban kontak dapat ditransmisikan ke *plane strain* di bawahnya. Beban kontak yang diberikan berupa *interference*. Selanjutnya menentukan kondisi batas dengan memberikan *constrain* terhadap sumbu *x*, dan *y*. Langkah penentuan load yaitu dari ABAQUS 6.10 Module pilih *Module > Load > Create Load > Interference*



Gambar 3.12 Plot load manager

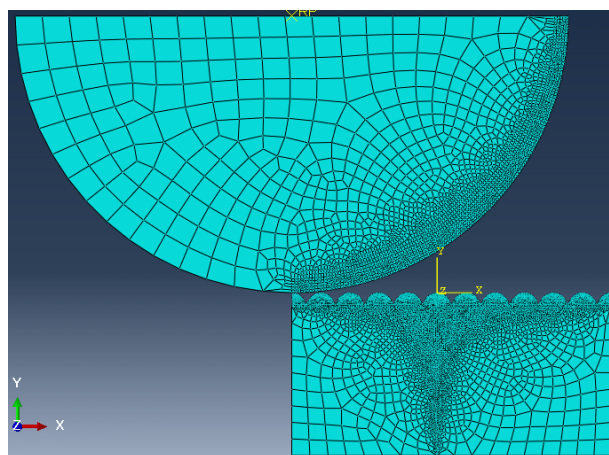
Langkah penentuan kondisi batas yaitu dari ABAQUS 6.10 *Module* pilih *Module > Load > Create Boundary Condition > Displacement/Rotation*. Hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar berikut:



Gambar 3.13 Plot *boundary condition manager*

3.3.9 Meshing

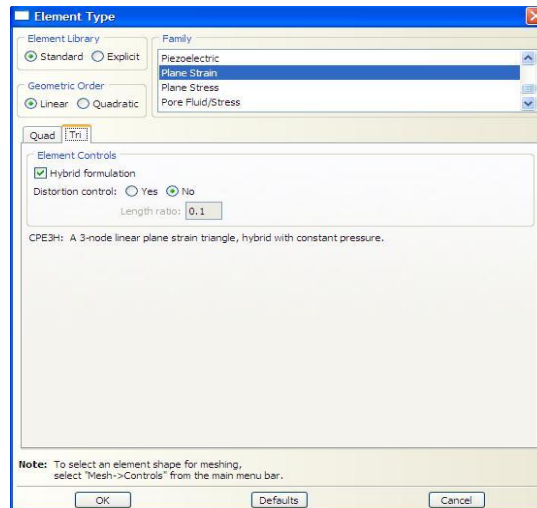
Proses *meshing* merupakan proses membagi komponen dalam elemen-elemen kecil. Langkah dalam melakukan *meshing*, yaitu dari ABAQUS 6.10 *Main menu* pilih *Main menu > Meshing > Create Mesh*.



Gambar 3.14 Plot *mesh control* dan hasil *meshing*

3.3.10 Penentuan Element Type

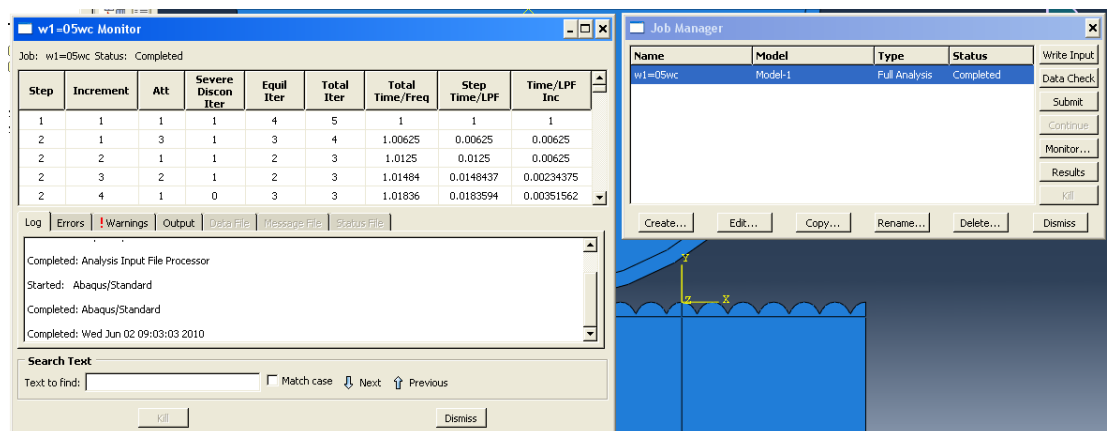
Langkah penentuan element type yaitu dari ABAQUS 6.10 *Module* pilih *Module* > *Mesh* > *Create Element type*. Hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar berikut:



Gambar 3.15 Plot penentuan *element type*

3.3.11 Job Manager

Langkah memasukkan hasil pemodelan untuk dijalankan oleh software ABAQUS 6.10 *Module* pilih *Module* > *Job* > *Create Job*. Hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 3.17

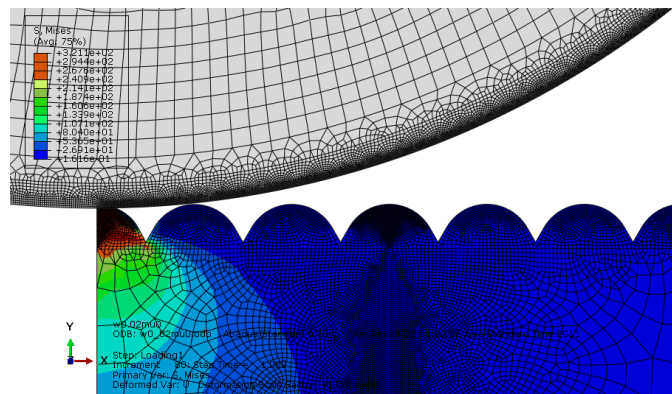


Gambar 3.16 Plot *job manager*

3.4 Prosedur Simulasi *Rolling Contact*

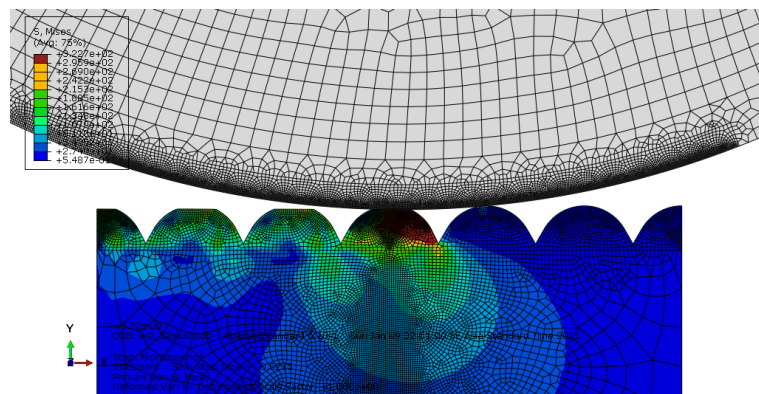
Dalam simulasi *rolling contact* ini, penulis membuat urutan simulasi sebelum pengambilan data yaitu sebagai berikut :

- Penekanan *indenter* terhadap bidang *rough surface*



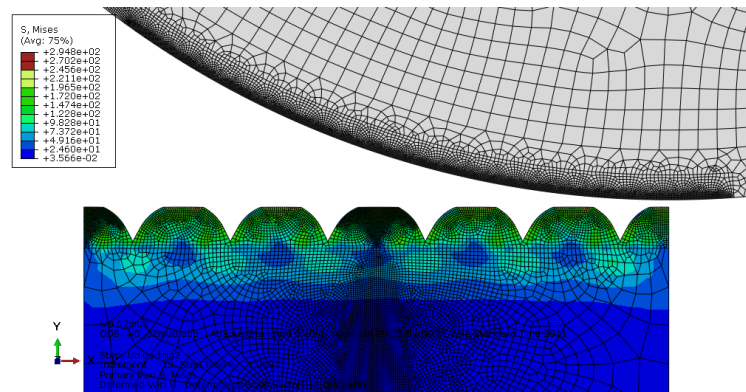
Gambar 3.17 *Indenter* menekan bidang *rough surface*

- Gerakan *rolling* dari *indenter* dengan tetap memberikan tekanan terhadap bidang *rough surface*.



Gambar 3.18 *Rolling contact* dengan tetap menekan dari *indenter* terhadap bidang *rough surface*

- Mengangkat *indenter* setelah selesai *rolling contact*, dan kembali pada posisi semula.



Gambar 3.19 *Indenter* melepaskan tekanan terhadap bidang *rough surface*

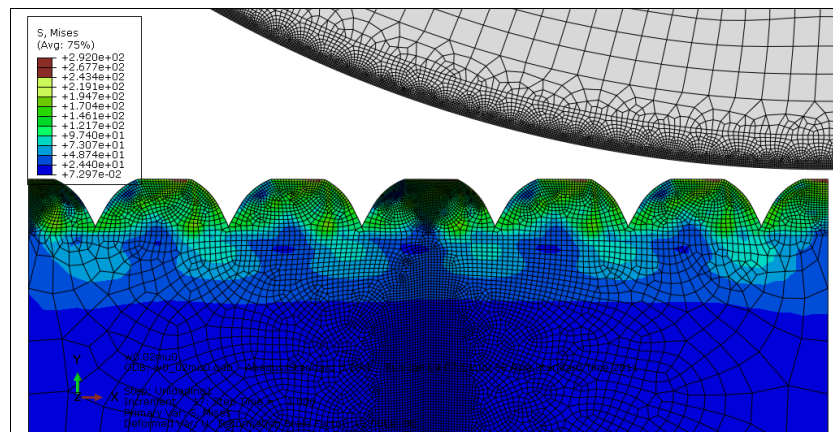
Ketiga step ini diulangi hingga tiga kali, sehingga didapatkan data yang cukup untuk dapat dianalisa.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

4.1 Efek koefisien gesek terhadap residual stress von Mises setelah *unloading*

Untuk pengambilan data dari nilai von Mises, diambil posisi saat *indenter* kontak dengan *asperity* yang paling tengah dan menekan sempurna *asperity* tersebut, seperti tampak pada Gambar 4.1.

Sedangkan untuk pengambilan data von Mises *unloading* yaitu : saat *indenter* sama sekali tidak menyentuh *rough surface*, ini dimaksudkan agar *rough surface* sama sekali tidak mendapat tekanan dari *indenter*, tampak pada Gambar 4.2.

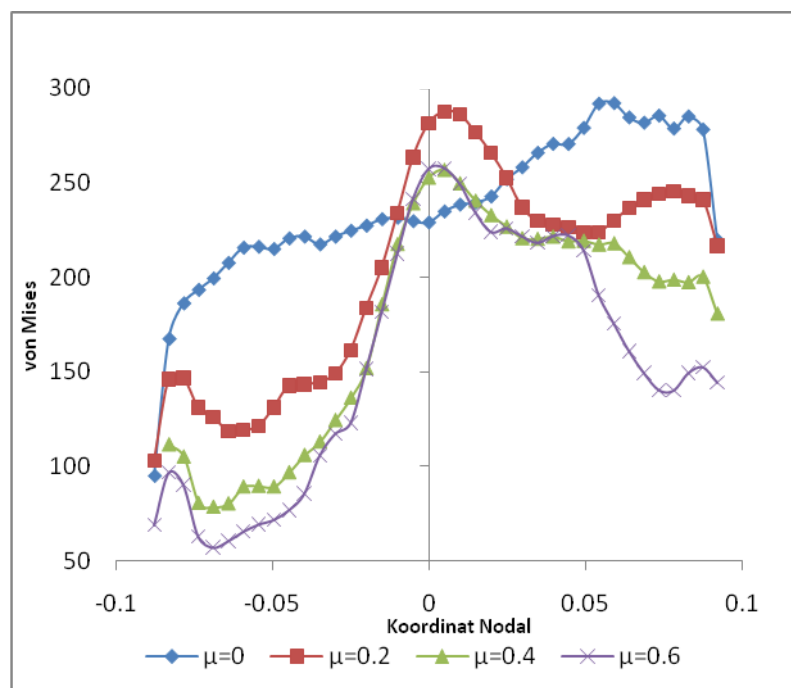


Gambar 4.1 Posisi *indenter* untuk pengambilan data von Mises
unloading

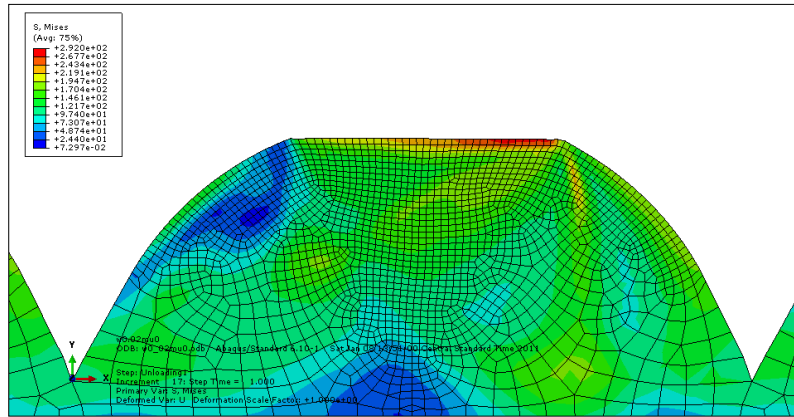
Hasil von Mises *unloading* untuk *rolling contact* silinder *rough surface* terlihat bahwa saat *indenter* yang kontak pada *asperity* tanpa tegangan geser nilai terbesar terdapat pada bagian akhir *asperity*. Ini disebabkan karena tidak ada gaya yang menahan *indenter* sehingga *asperity* terlihat seperti terdorong oleh gerakan *rolling indenter*.

Sedangkan *rolling contact* silinder *rough surface* yang disertai tegangan geser, nilai von Mises terbesar terjadi di tengah-tengah *asperity*. Di sebabkan karena koefisien gesek yang dimiliki *asperity* menahan berlawanan arah dengan gerakan *indenter*.

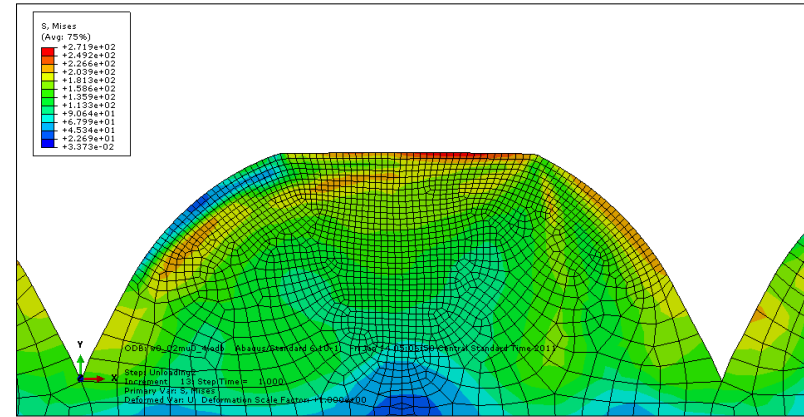
Pada Gambar 4.5 tampak dengan jelas nilai von Mises dari *asperity* saat *indenter* telah tidak bersinggungan sama sekali dengan *rough surface*. Walaupun *indenter* tidak kontak lagi dengan *rough surface*, tampak bahwa *asperity* masih menyimpan tegangan sisa. Dan nilai terbesar untuk *asperity* yang tidak disertai koefisien gesek adalah 292,047Mpa pada koordinat nodal 976, nodal tersebut terletak pada bagian akhir *asperity*.



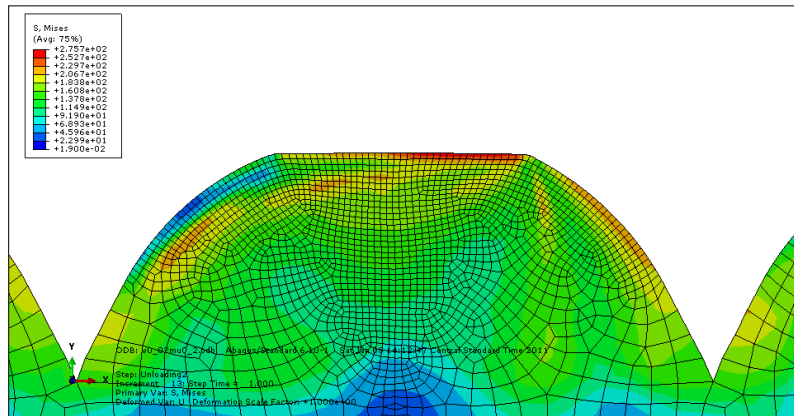
Gambar 4.2 von Mises *unloading*



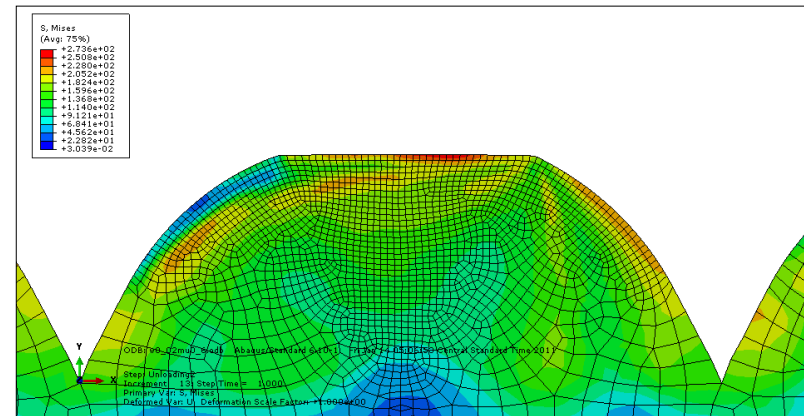
(a)



(b)



(c)



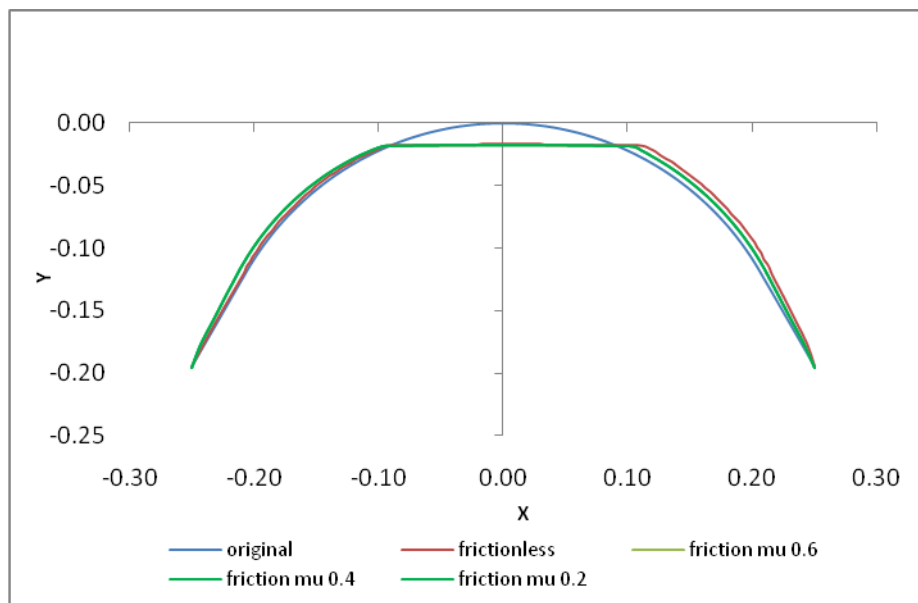
(d)

Gambar 4.3 Tegangan von Mises saat *unloading* pada (a) $\mu=0$; (b) $\mu=0.2$; (c) $\mu=0.4$; (d) $\mu=0.6$

4.2 Efek koefisien gesek pada topografi permukaan

Pada topografi hasil kontak *rolling* silinder-*rough surface* memperlihatkan bahwa *asperity* frictionless yang terdeformasi mengalami perubahan bentuk yang condong di bagian kanan, karena tidak ada gaya perlawanan terhadap *indenter*.

Sedangkan *asperity* yang memiliki koefisien gesek saat dikenai kontak *rolling* tampak lebih seimbang antara bagian kanan dan kiri *asperity*. Disebabkan karena koefisien gesek pada *asperity* mempertahankan kedudukannya dari kontak *rolling*. Seakan-akan *asperity* tersebut hanya mendapat tekanan dari atas, bukan dari gerakan sliding. Topografi dari *rolling contact* tampak pada Gambar 4.3.

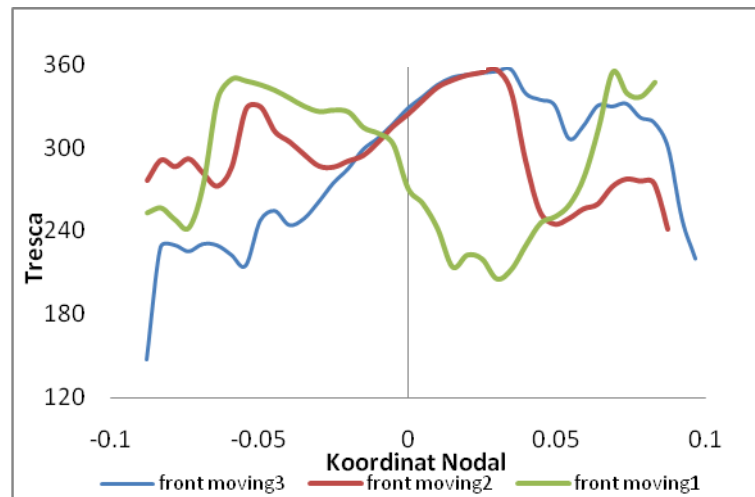


Gambar 4.4 Topografi permukaan

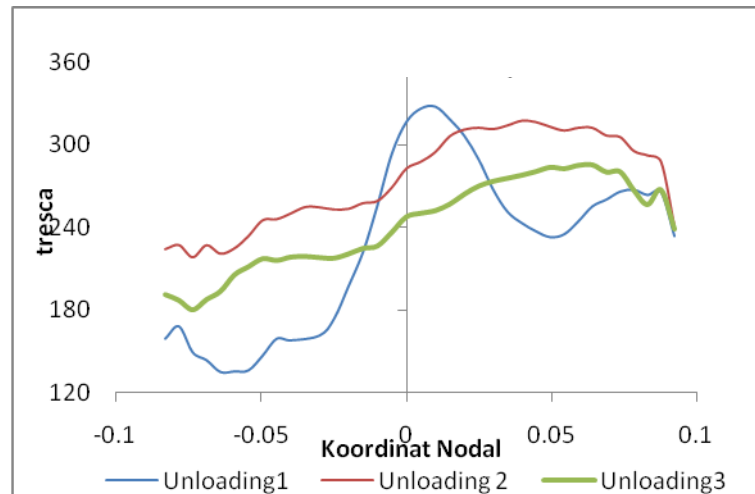
4.3 Efek *repeated rolling contact*

Efek dari *repeated rolling* kontak adalah besarnya tegangan sisa yang terdapat pada tiap nodal, ini dikarenakan suatu nodal yang telah memiliki tegangan sisa saat *loading* pertama dikenai dengan gaya saat *loading* berikutnya sehingga tegangan sisa terdapat pada nodal tersebut dapat menjadi lebih tinggi atau lebih rendah.

Tampak pada Gambar 4.8 – 4.11 tegangan sisa tiap step selalu berbeda, dan bila diamati pada Gambar 4.8 – 4.9 tampak pula memiliki karakteristik yang berbeda setiap stepnya.

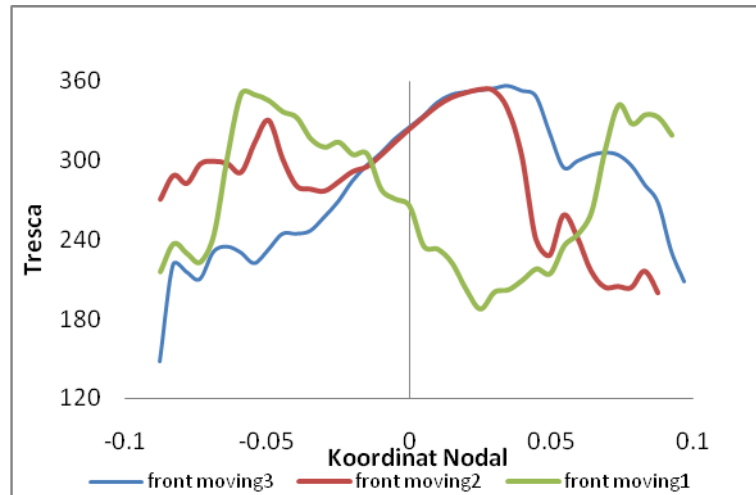


(a)

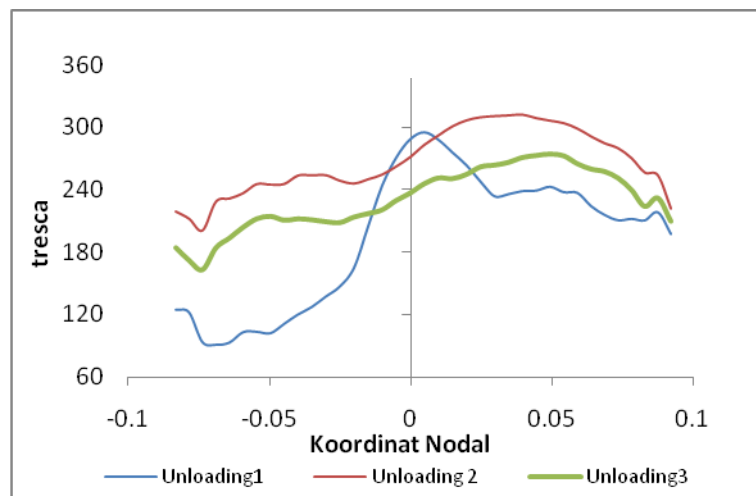


(b)

Gambar 4.5 Tresca $\mu=0,2$ saat (a) loading ; (b) unloading

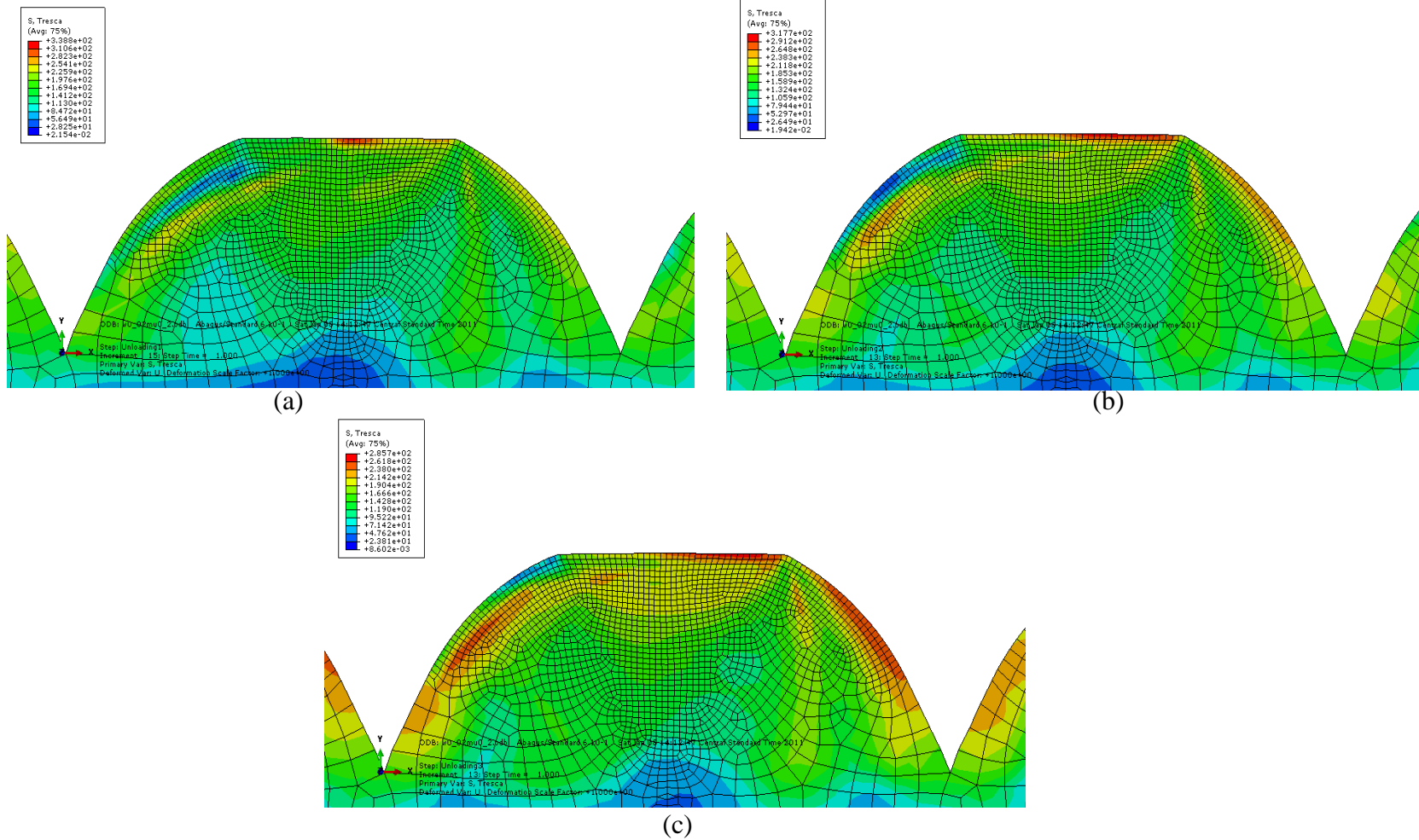


(a)

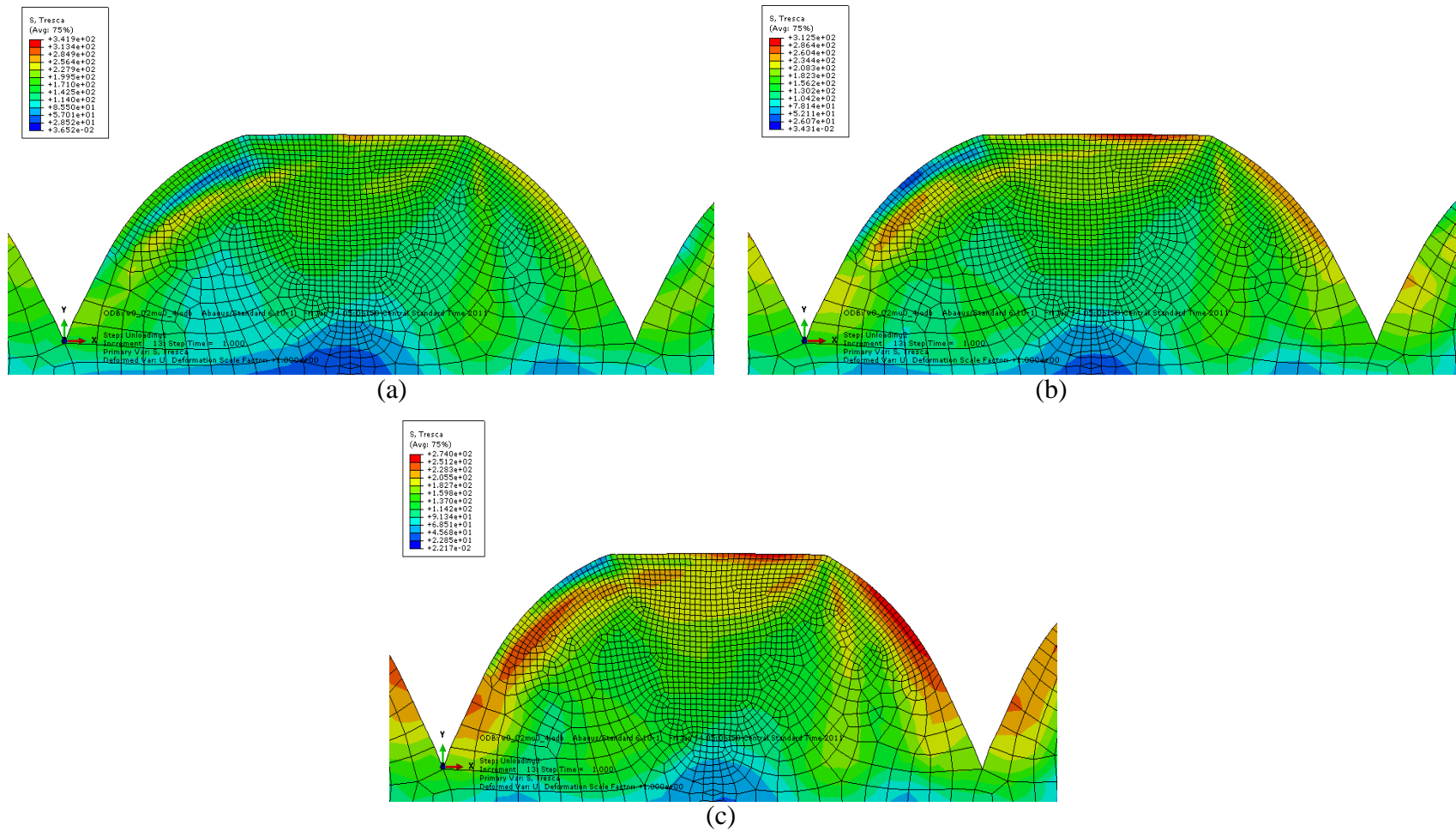


(b)

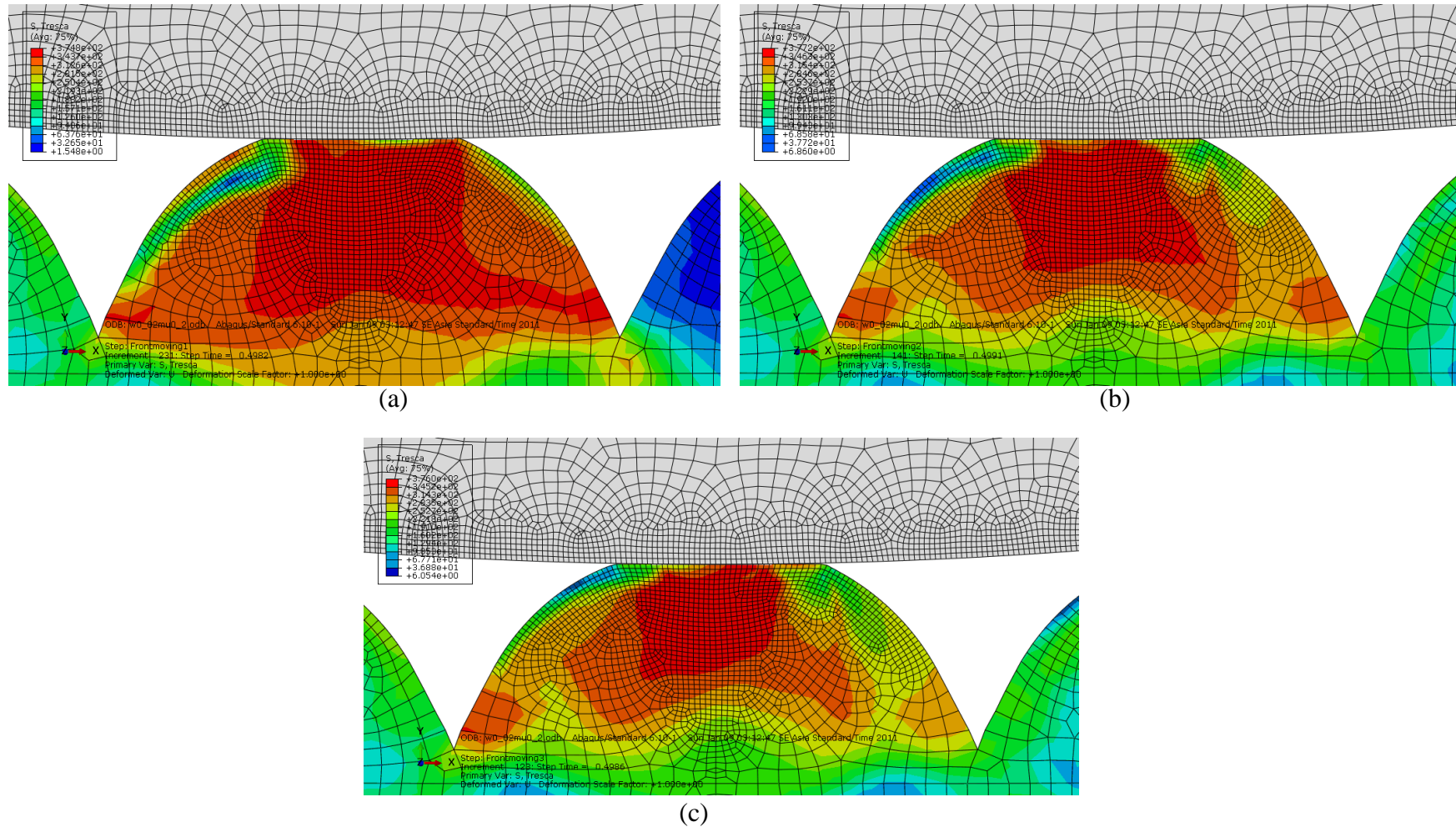
Gambar 4.6 Tresca $\mu=0,4$ saat (a) loading ; (b) unloading



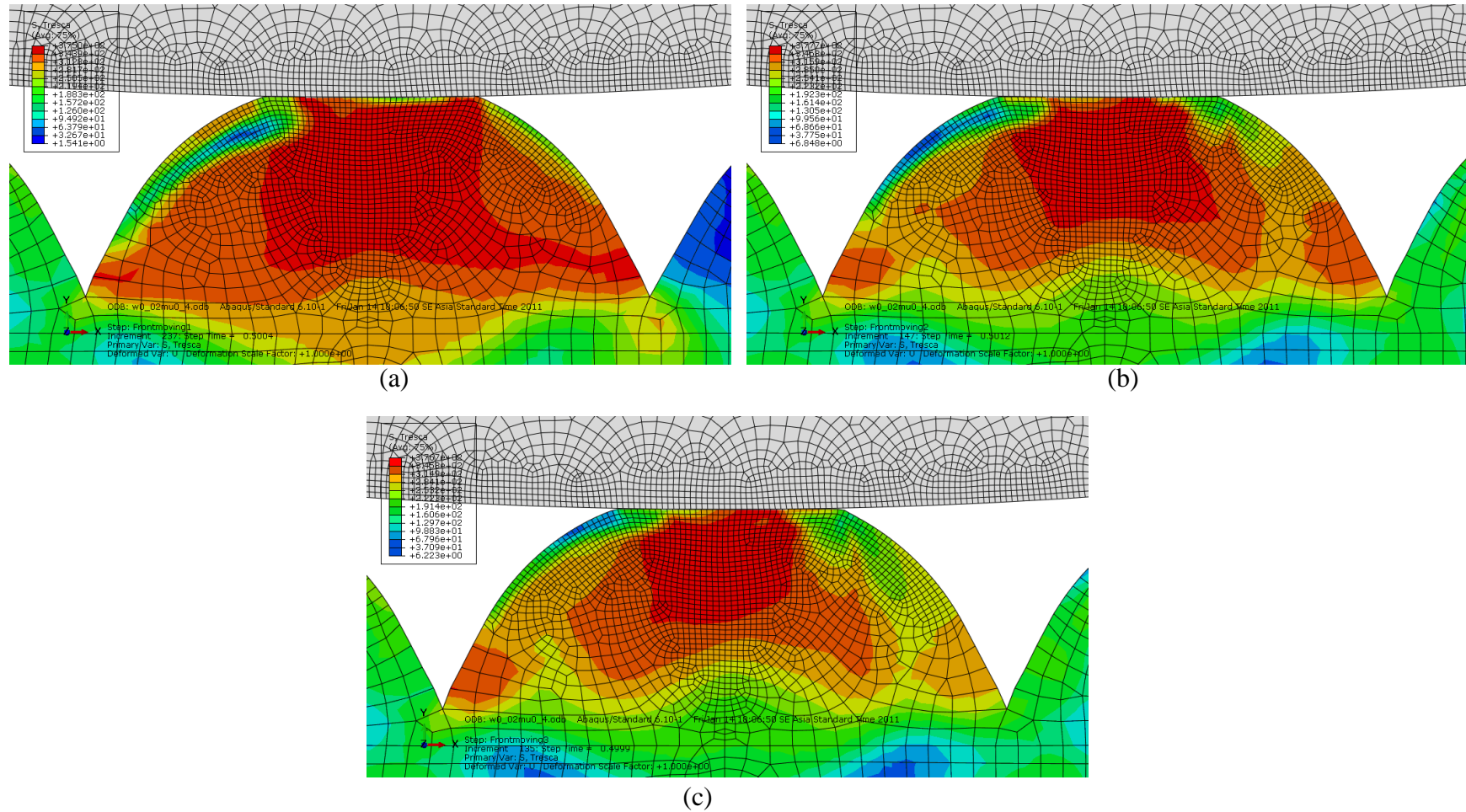
Gambar 4.7 Hasil tegangan Tresca $\mu=0,2$ saat (a) unloading 1; (b) unloading 2; (c) unloading 3



Gambar 4.8 Hasil tegangan Tresca $\mu=0,4$ saat (a) unloading 1; (b) unloading 2; (c) unloading 3



Gambar 4.9 Hasil tegangan Tresca $\mu=0,2$ saat (a) loading 1; (b) loading 2; (c) loading 3

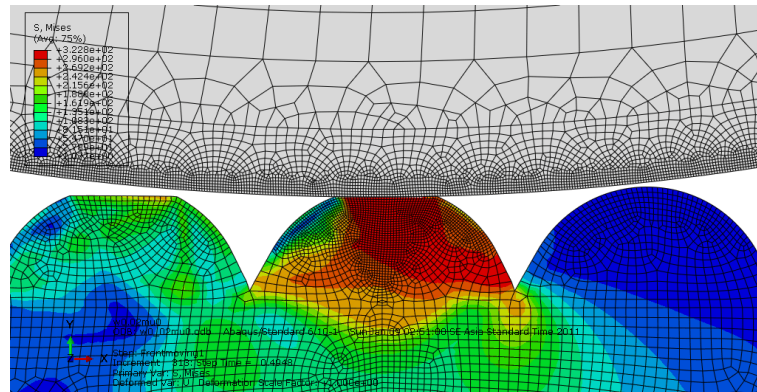


Gambar 4.10 Hasil tegangan Tresca $\mu=0,4$ saat (a) loading 1; (b) loading 2; (c) loading 3

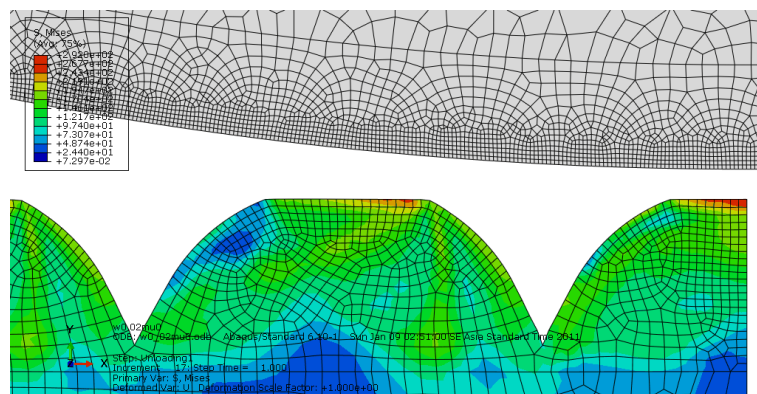
4.4 Efek koefisien gesek terhadap tegangan geser(Tresca)

Dalam pemodelan ini, asperiti yang menjadi acuan pengambilan data terletak di tengah dari *rough surface*. Dan kondisi saat pengambilan data tegangan geser (tresca) *loading* yaitu saat *indenter* berada tepat diatas *asperity*, ini bertujuan agar didapatkan nilai tegangan maksimal dari *asperity* yang terkena *loading* dari *indenter*, tampak pada gambar 4.1

Sedangkan untuk pengambilan data tegangan geser (tresca) *unloading* yaitu : saat *indenter* sama sekali tidak menyentuh *rough surface*, ini dimaksudkan agar *rough surface* sama sekali tidak mendapat tekanan dari *indenter*, seperti tampak pada Gambar 4.2



Gambar 4.11 Posisi *indenter* untuk pengambilan data *loading*



Gambar 4.12 Posisi *indenter* untuk pengambilan data *unloading*

4.4.1 *Loading*

Hasil pemodelan tegangan geser saat *loading* yang disertai dengan tegangan geser maupun tidak, terlihat bahwa terdapat perbedaan nilai tegangan maupun kontur *asperity* yang terdeformasi. Pada *asperity* yang dikenai *rolling* kontak tanpa disertai tegangan geser nilai maksimum tegangan sebesar ± 350 Mpa dan terlihat merata dibagian puncak *asperity*.

Untuk *asperity* yang dikenai kontak *rolling* kondisi *loading* disertai koefisien gesek, nilai tegangan yang bernilai besar terjadi disaat awal dan akhir terjadi kontak. Kontur *asperity* dapat dilihat pada Gambar 4.3.

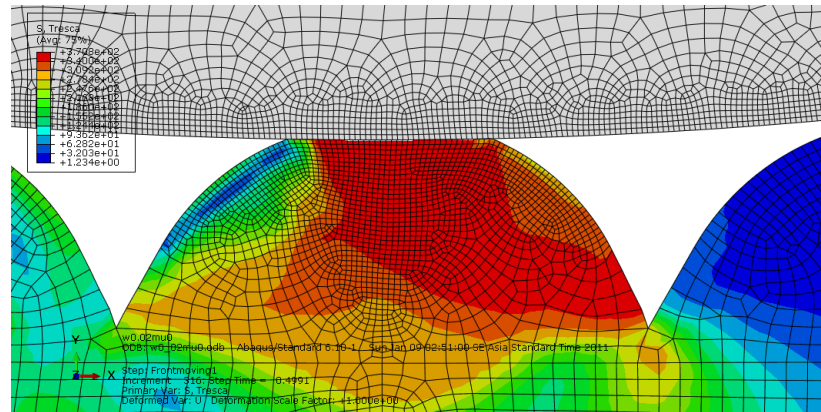
Fenomena ini dapat terjadi karena benda yang mempunyai koefisien gesek mempunyai kemampuan untuk menahan benda yang kontak dengan benda tersebut. Dan gaya terbesar terdapat pada titik *asperity* yang terkena kontak saat pertama kali dan terakhir kali. Besaran nilai tegangan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 4.1

4.4.2 *Unloading*

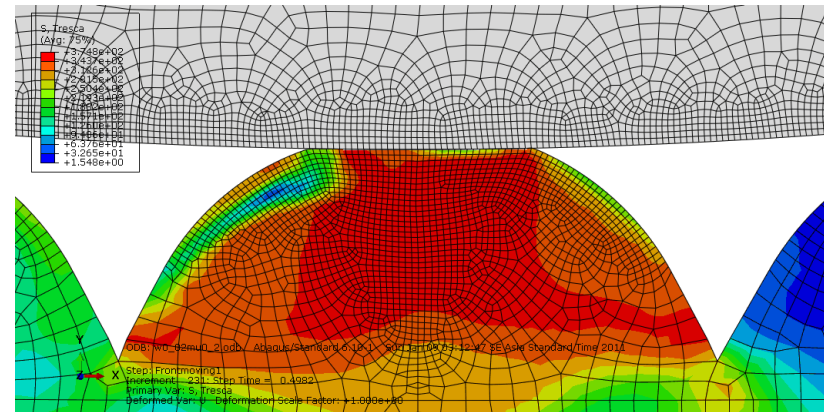
Sedangkan saat *unloading* dan tanpa disertai tegangan geser, tegangan sisa didapatkan nilai maksimum 300 Mpa dan hanya terjadi di akhir *asperity*.

Berkebalikan dengan kondisi *loading*, nilai tegangan sisa yang bernilai maksimal terdapat pada bagian tengah *asperity*. Dengan kata lain tegangan sisa terbesar terdapat pada titik *asperity* yang terkena kontak *rolling* saat ditengah-tengah kontak, Kontur *asperity* dapat dilihat pada Gambar 4.4.

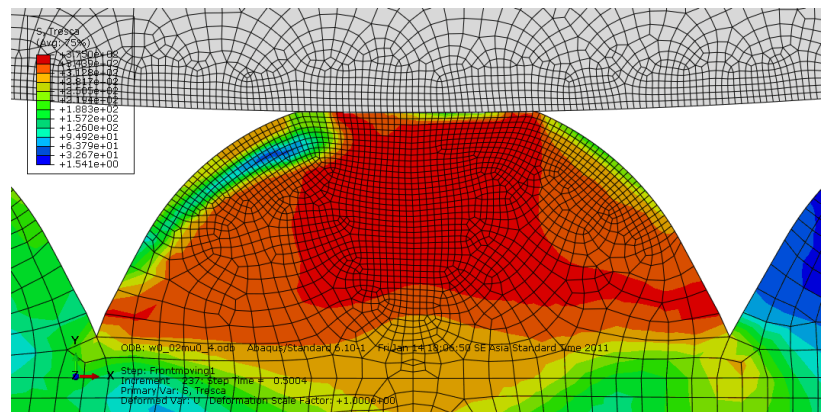
Asperity yang memiliki tegangan geser, tampak bahwa tegangan yang sisa terdapat pada hampir dikeseluruhan *asperity*. Dengan kata lain bahwa seluruh bagian dari *asperity* mempertahankan kedudukannya di saat *indenter* tidak kontak lagi dengan *rough surface*. Besaran nilai tegangan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 4.1.



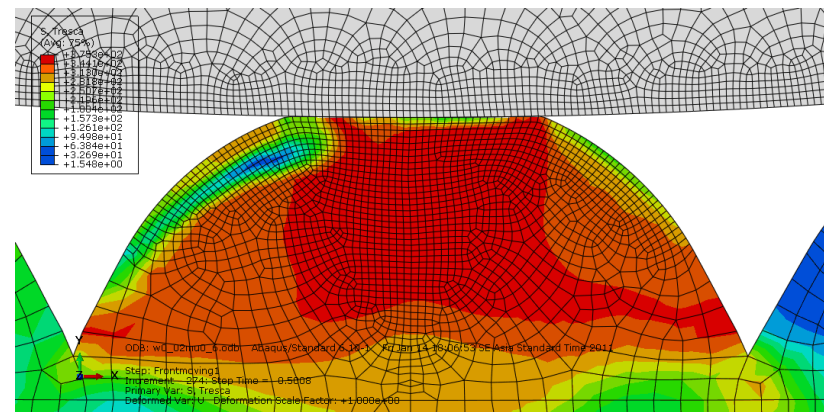
(a)



(b)

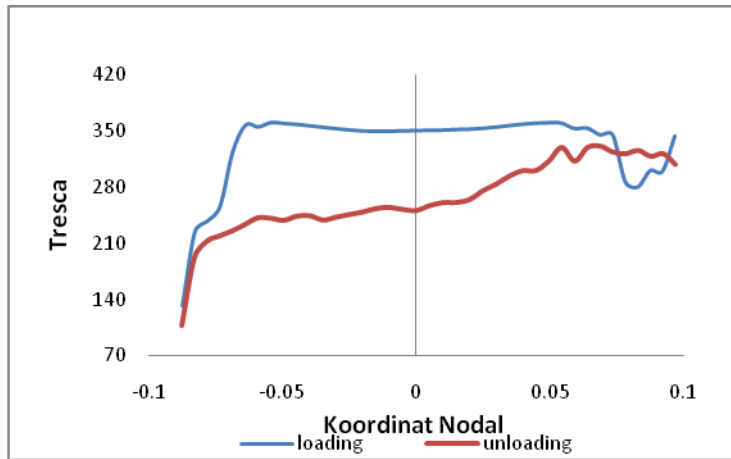


(c)

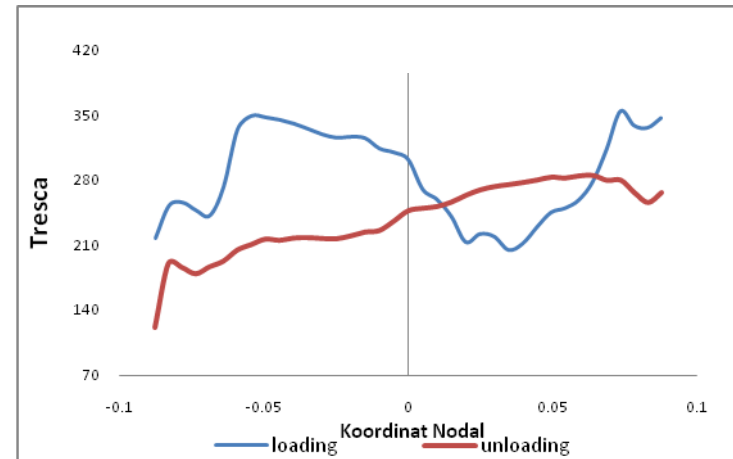


(d)

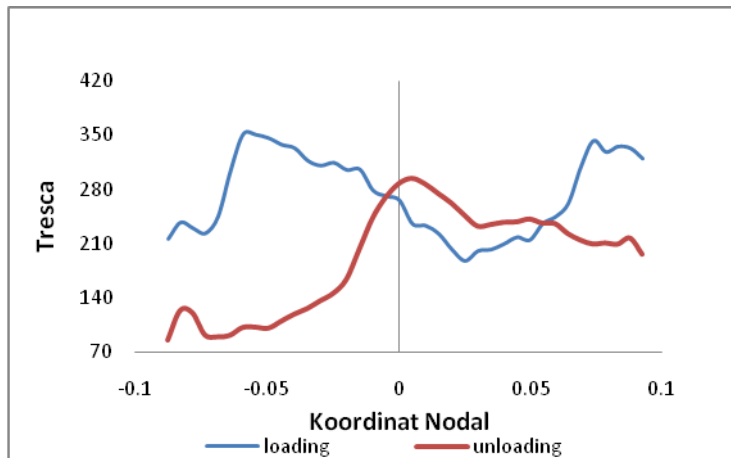
Gambar 4.13 Tegangan geser Tresca saat *loading* pada (a) $\mu=0$; (b) $\mu=0.2$; (c) $\mu=0.4$; (d) $\mu=0.6$



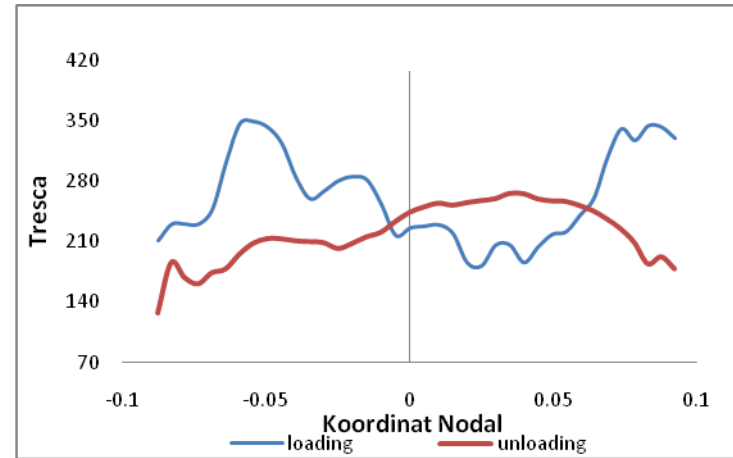
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.14 Tegangan geser Tresca saat *loading-unloading* pada (a) $\mu=0$; (b) $\mu=0.2$; (c) $\mu=0.4$; (d) $\mu=0.6$

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Besar pembebanan yang dilakukan sangat berpengaruh terhadap bentuk kontur permukaan dan tegangan maksimum serta tegangan sisa yang terjadi pada *contact area* maupun bidang dari *asperity*.
2. Pada kondisi material elastis plastis terdapat perbedaan kontur dan nilai tegangan tresca maupun tegangan von Mises antara *asperity* saat dikenai kontak maupun tidak dan disertai koefisien gesek maupun tidak.
3. *Asperity* yang memiliki koefisien gesek saat dikenai kontak *rolling*, cenderung dapat mempertahankan bentuk kontur. Sehingga terlihat lebih berimbang bentuk kontur pada bagian kanan maupun kiri.
4. Efek dari repeated kontak adalah berpindahnya besar tegangan sisa yang terdapat pada suatu nodal, karena terpengaruh oleh tegangan sisa dari kotak *rolling* pada step sebelumnya dan kontak *rolling* berikutnya.

5.2 Saran

1. Perlu adanya penyempurnaan simulasi dengan *FEM* dengan menyempurnakan teknik *meshing* agar didapatkan data yang lebih banyak.
2. Penelitian lebih lanjut dapat dikembangkan dengan menggunakan variasi material elastis-plastis agar simulasi dapat digunakan untuk kasus-kasus dengan pembebanan yang bervariasi lagi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hertz, H., , “*Über die berührung fester elastische korper and uber die harte*”, Verhandlungen des Vereins zur Beforderung des Gewerbefleisses, Leipzig, (1882).
- [2] Greenwood, J.A. and Williamson J.B.P., “*Contact of Nominally Flat Surfaces*”, Proc. Royal Soc. Lond. 295A, pp 300-319, (2001).
- [3] Kogut, L. and Etsion, I., “*Elastis-plastis contact analysis of a sphere and a rigid flat*”, ASME Journal Appl. Mech, Vol. 69, pp. 657-662, (2002).
- [4] Jamari, J. “*Running-in of Rolling Contacts*”. PhD Thesis, Twente University, Zutphen, The Netherlands, (2006).
- [5] Li, L. Z., Kalker J. J. *The Computation of Wheel-Rail Conformal Contact*. Computational Mechanics, New Trends and Applications, S. Idelsohm, E Onate and E Dvorkin (Eds), CIMME, Barcelona, Spain. (1998).
- [6] Merwin, J. E., and Johnson, K.L. *An Analysis of Plastic Deformation in Rolling Contact*. Proc.Inst.Mech.Eng.,Vol. 177, p. 667. (1963).
- [7] Johnson, K. L., and Jefferis, J.A. *Plastic Flow and Residual Stresses in Rolling and Sliding Contact*. Proc.Symp.on Fatigue in Rolling Contact, Inst. Mech. Eng. London. (1963).
- [8] Martin, G.C., and Hay, W. W. *The Influence of Wheel-Rail Contact-Forces on the Formation of Rail Steels*. Paper 72-WA/RT-08, ASME, New York. (1972).
- [9] Tsukizoe T. and Hisakado T., “*On the Mechanism of Contact between Metal Surfaces- the Penetrating Depth and The Average Clearance*”, J. Basic Eng. 87,pp 666-674, (1965).
- [10] Chang, W.R., Etsion I. and Bogy D.B.,, “*An Elastis-Plastis Model for the Contact of Rough Surface*”, J. Tribol. 109, pp 257-263, (1987).
- [11] Johnson, K. L. *Contact Mechanics*, 9th Edition, Cambridge University Press, New York, (1985).

- [12] Bhowmik, K, “*Exsperimental and finite element study of elastis-plastis indentation of rough surface*”, Departement of Mechanical Engineering, Indian Institute of Science, (2007).
- [13] Evseev, D.G., Medvedev B.M. and Grigoriyan G.G., “*Modification of the Elastis- Plastis Model for Contact of Rough Surface*”, Wear 150, pp 79-88, (1991).
- [14] Bhargava,V.,Hahn,G.T., and Rubin, C.A. *An Elastic-Plastic Finite Element Model of Rolling Contact: Part 1: Analysis of Single Contacts.* ASME Journal of Applied Mechanics, Vol.51, pp. 00-00. (1984).
- [15] Bhargava,V.,Hahn,G.T., and Rubin, C.A. *An Elastic-Plastic Finite Element Model of Rolling Contact: Part 2: Analysis of Repeated Contacts.* ASME Journal Of Applied Mechanics, Vol.52, pp. (1985).
- [16] [Http://www.airspeeduk.com](http://www.airspeeduk.com)