

TUGAS SARJANA

ANALISA PENGARUH BENTUK UJUNG *INDENTER*
TERHADAP NILAI KEKERASAN PERMUKAAN PADA
***NANO-INDENTATION TEST* MENGGUNAKAN**
METODE ELEMEN HINGGA



Diajukan sebagai salah satu tugas dan syarat
untuk memperoleh gelar Sarjana (S-1)
Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Diponegoro

Disusun oleh:
ARIS SUPRAPTO
L2E 307 008

JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2010

TUGAS SARJANA

Diberikan kepada:

Nama : Aris Suprpto

NIM : L2E 307 008

Pembimbing : Ir. Sugiyanto, DEA

Jangka Waktu : 12 (dua belas) bulan

Judul : Analisa Pengaruh Bentuk Ujung *Indenter* terhadap Nilai Kekerasan Permukaan pada *Nano-indentation Test* Menggunakan Metode Elemen Hingga.

Isi Tugas :

1. Analisa faktor geometri kontak *tip roundness* dan *surface roughness specement* dapat mempengaruhi sifat material *yield stress* dan kekerasan permukaan pada kedalaman *indentation* yang kecil.
2. Analisa *rough-surface* dan *cavity* untuk menunjukkan efek dari kelengkungan jari-jari terhadap nilai *hardness*.
3. Analisa informasi *nano-indentation* dari sifat mekanik material menghasilkan nilai *yield hardness* secara *independent* dari kedalaman *indentation* material *elastic perfectly plastic*.

Dosen Pembimbing,

Ir. Sugiyanto, DEA.

NIP. 196 001 251 987 031 001

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Sarjana dengan judul “**Analisa Pengaruh Bentuk Ujung *Indenter* terhadap Nilai Kekerasan Permukaan pada *Nano-indentation Test* Menggunakan Metode Elemen Hingga**” yang disusun oleh:

Nama : Aris Suprpto

NIM : L2E 307 008

Telah disetujui pada:

Hari :

Tanggal :

Dosen Pembimbing

Ir. Sugiyanto, DEA.

NIP. 196 001 251 987 031 001

Mengetahui,

Koordinator Tugas Sarjana

Pembantu Dekan I Fakultas Teknik

Dr. MSK. Tony Suryo Utomo, ST, MT.

NIP. 197 104 211 999 031 003

Ir. Bambang Pudjianto, MT.

NIP. 195 212 051 985 031 001

ABSTRAK

Nano-indentation telah memberikan informasi yang berharga tentang sifat mekanika material yang ukurannya sangat kecil *bulk* atau sebagai *films* dan *coatings*. Pengaruh geometri kontak, termasuk *round tip indenter* dan kekasaran *specimen*, pada perilaku kekerasan material *elastic perfectly plastic* dipelajari dengan cara simulasi elemen hingga. Dengan mengidealkan *indenter* secara nyata dengan *rigid conic indenter* mencoba dengan lembut ujung *spherical* dan menguji interaksi *indenter* dengan *flat surface* dan *rough surface*. Dalam kasus terakhir *rough surface* diwakili oleh sebuah *spherical asperity* dan *cavity*. Perilaku *indentation* material *heterogen* dengan memiliki konstituen yang sangat berbeda pada *mechanical properties*. Heterogenitas mikrostruktural material *elastic perfectly plastic* model elemen hingga *nano-layers*.

Tujuan analisa ini bagaimana faktor geometri kontak, yaitu *tip roundness* dan kekasaran permukaan *specimen* dapat mempengaruhi perilaku *hardness* pada kedalaman *indentation* yang kecil, efek kelengkungan *asperity* dan *cavity* di permukaan *specimen* dapat menyebabkan perubahan dalam nilai-nilai kekerasan dan respon material heterogen pada proses *recovery* diamati dalam fase tunggal, efek deformasi dianalisa selama *load* dan *unload*. Hasilnya menunjukkan nilai *hardness* antara *present* model dengan model Li et al. menunjukkan hasil yang baik dengan beda keberhimpitan yang kecil. Hasilnya menunjukkan bahwa nilai *equivalent plastic strain versus indentation depth* antara *present* model dengan model Tang et al. selisihnya kecil.

Kata kunci: kontak statis, *round tip indenter*, *rough surface*, *hardness* dan *nano-indentation*.

ABSTRACT

Nano-indentation has provided valuable information on the mechanical property of materials in very small size in bulk or as thin films and coatings. Influence of contact geometry, including the round tip of the indenter and the roughness of the specimen, on hardness behavior for elastic perfectly plastic materials is studied by means of finite element simulation. Idealize the actual indenter by an equivalent rigid conic indenter fitted smoothly with a spherical tip and examine the interaction of this indenter with both a flat surface and a rough surface. In the latter case the rough surface is represented by either a single spherical asperity and a cavity. The indentation behavior of a heterogeneous material with constituents having distinctly different mechanical properties. The microstructural heterogeneity by an elastic perfectly plastic finite element model nano-layers.

This analysis aimed to influence of contact geometry, is tip roundness and surface roughness of specimen can influence behavior of hardness at depth of indentation which is small, curvature effect of asperity and cavity on the surface of the test specimen can cause further changes in hardness values and response in these heterogeneous materials is much more complex the recovery process observed in single-phase metals, deformation effect is analyzed during load and unload. Result of it's showing value hardness between present model with model Li et al. show good result with difference at close quarters small. Result of it's indicating that value equivalent plastic strain versus indentation depth between present model with model Tang et al. the small difference.

Keywords: static contact, round tip indenter, rough surface, hardness and nano-indentation.

HALAMAN PERSEMBAHAN

Tugas Akhir ini saya persembahkan untuk:

1. Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya.
2. Umi dan Abah tercinta yang selalu memberikan do'a dan dukungan baik moril maupun material yang tak bisa saya untuk membalasnya.
3. Kangmasku tersayang Bambang Sujarin, ST dan Kapten. Tarmuji Herman, ANT III atas fasilitas dan dukungan baik moril maupun material.

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. Bapak Ir. Sugiyanto, DEA selaku dosen pembimbing Tugas Sarjana.
2. Bapak Dr. Ir. Dipl. Ing. Berkah Fajar TK selaku ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Diponegoro.
3. Bapak Dr. Jamari, ST, MT., Bapak Rifky Ismail, ST, MT., dan Bapak M. Tauviqurrahman, ST, MT. selaku dosen pembimbing pada LAB. EDT.
4. 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, Mei 2010

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN TUGAS SARJANA.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
HALAMAN ABSTRAK.....	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xv
NOMENKLATUR.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan Penulisan	3
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Metodologi Penelitian.....	4
1.5. Sistematika Penulisan	6
BAB II <i>INDENTER</i>	7
2.1. Pendahuluan.....	7
2.2. Geometri <i>Indenter</i>	7
2.3. Karakteristik Material.....	9
2.3.1. Material <i>Homogen</i>	9
2.3.2. Material <i>Hetrogen</i>	11
2.4. Gesekan (<i>friction</i>).....	12
2.4.1. Menentukan Gaya Normal	12
2.4.2. Menentukan Gaya Gesekan	12

2.5. Aplikasi.....	14
2.5.1. Proses Manufaktur pada Permukaan <i>Layer</i>	14
2.5.2. <i>Micro Mechanical Systems</i>	16
 BAB III KONTAK NORMAL <i>ELASTIC-PLASTIC</i>	17
3.1. Pendahuluan.....	17
3.2. Kriteria <i>Plastic Yield</i>	18
3.3. <i>Indentation Elastic-Plastic</i>	19
3.4. Siklus <i>Loading</i> dan <i>Unloading</i>	22
3.5. <i>Sink-in</i> dan <i>Pile-up</i>	26
 BAB IV PEMODELAN KASUS KONTAK DENGAN METODE ELEMEN HINGGA.....	28
4.1. Pendahuluan.....	28
4.2. Teori Dasar Metode Elemen Hingga.....	29
4.2.1. Konsep Dasar Analisa MEH	29
4.2.2. Prosedur Analisa Struktur	29
4.2.3. Implementasi-implementasi pada Komputer	30
4.2.4. Jenis Elemen pada MEH	30
4.2.5. Fungsi elemen pada metode elemen hingga mengacu pada <i>polynomial</i>	31
4.3. <i>Flow Chart</i> Pemodelan dalam FEM <i>Abaqus</i> 6.5-1.....	39
4.4. Spesifikasi Masalah dan Geometri	40
4.5. Langkah-langkah Pemodelan pada FEM <i>Abaqus</i> 6.5-1	41
4.5.1. Proses <i>Pre-Processing</i>	41
4.5.1.1. Penentuan Geometri	41
4.5.1.2. Penentuan Sifat Material pada Model	45
4.5.1.3. Menggabungkan <i>Part</i> 1 dan <i>Part</i> 2 (<i>assembly</i>)	48
4.5.2. <i>Solution</i>	48

4.5.2.1.	<i>Step</i>	48
4.5.2.2.	<i>Interaction</i>	49
4.5.2.3.	Membuat Kondisi Batas.....	52
4.5.2.4.	<i>Mesh</i>	57
4.5.3.	Proses <i>Post-Processing</i>	62
4.5.3.1.	<i>Job</i>	62
4.5.3.2.	<i>Visualization</i>	64
BAB V	HASIL DAN ANALISA.....	66
5.1.	Nilai <i>Hardness</i>	66
5.2.	<i>Load</i> dan <i>Unload</i>	69
5.2.1.	<i>Residual Stress</i>	69
5.2.2.	Perhitungan <i>Elastic Spring Back</i>	71
5.3	<i>Indentation Rigid Sphere (R₁)</i> dengan <i>Sphere (R₂)</i> <i>dan Cavity (-R₂)</i>	71
5.4	Efek pada Material <i>Multylayer</i>	73
BAB VI	KESIMPULAN DAN SARAN.....	75
6.1.	Kesimpulan	75
6.2.	Saran	76
DAFTAR PUSTAKA	77
LAMPIRAN	79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Komponen-komponen mesin saling kontak.....	2
Gambar 1.2	<i>Flow chart</i> penelitian.....	5
Gambar 2.1	Bentuk ujung <i>Indenter</i>	8
Gambar 2.2	Pengaruh ujung <i>indenter</i> terhadap area kontak.....	9
Gambar 2.3	Kasus kontak <i>asperity</i>	10
Gambar 2.4	Ilustrasi model <i>multilayer</i>	11
Gambar 2.5	Menentukan gaya normal.....	12
Gambar 2.6	Menentukan gaya gesek.....	13
Gambar 2.7	Struktur topografi yang tidak rata (<i>asperity</i>).....	14
Gambar 2.8	Komponen yang mengalami proses <i>running-in</i>	15
Gambar 3.1	Skematik <i>indentation</i>	23
Gambar 3.2	Efektif sudut <i>elastic indenter</i>	24
Gambar 3.3	Efek variasi <i>yield stress</i> dengan <i>Young's modulus</i> σ_y/E	26
Gambar 3.4	Skematik <i>sink-in</i> dan <i>pile-up</i>	26
Gambar 4.1	Elemen garis.....	30
Gambar 4.2	Elemen bidang.....	30
Gambar 4.3	Elemen volume.....	31
Gambar 4.4	Model <i>axisymmetric</i>	31
Gambar 4.5	Elemen <i>quadratic</i>	32
Gambar 4.6	Kekakuan $[K]$	32
Gambar 4.7	Analisa elemen persegi empat.....	33
Gambar 4.8	Elemen <i>plane stress</i>	34
Gambar 4.9	Bidang <i>stress</i>	35
Gambar 4.10	<i>Deviator component</i>	35
Gambar 4.11	<i>Stress state</i>	37
Gambar 4.12	<i>Flow chart</i> pemodelan dalam FEM <i>Abaqus 6.5-1</i>	39

Gambar 4.13	Kontak antara <i>indenter</i> dengan <i>multilayerd solid</i>	39
Gambar 4.14	Diskripsi kondisi batas	41
Gambar 4.15	Menu <i>create part</i>	42
Gambar 4.16	<i>Plot lines</i> dan <i>angle</i>	43
Gambar 4.17	<i>Part</i>	43
Gambar 4.18	Menu <i>create part</i>	43
Gambar 4.19	<i>Plot lines</i> dan <i>Regtangle (4line)</i>	44
Gambar 4.20	<i>Parts</i>	44
Gambar 4.21	Material <i>elastic</i>	45
Gambar 4.22	Material <i>plastic</i>	46
Gambar 4.23	<i>Create section</i>	47
Gambar 4.24	<i>Edit section</i>	47
Gambar 4.25	<i>Section assignment parts 1</i>	47
Gambar 4.26	<i>Assembly parts</i>	48
Gambar 4.27	<i>Create step</i>	49
Gambar 4.28	<i>Edit step</i>	49
Gambar 4.29	<i>Create interaction</i>	50
Gambar 4.30	<i>Edit interaction</i>	50
Gambar 4.31	<i>Edit interaction</i> dan <i>contact property</i>	51
Gambar 4.32	<i>Plot contact</i>	52
Gambar 4.33	<i>Reference point</i>	52
Gambar 4.34	<i>Rigid body</i>	53
Gambar 4.35	<i>Create boundary condition</i>	53
Gambar 4.36	Menu <i>boundary condition</i>	54
Gambar 4.37	<i>Create boundary condition</i>	55
Gambar 4.38	Pemilihan <i>line</i> pada <i>cone</i> dan <i>half-space</i> untuk penentuan kondisi batas.....	55
Gambar 4.39	Kondisi batas yang telah jadi	56
Gambar 4.40	<i>Create displacement</i>	56

Gambar 4.41	Hasil akhir penentuan kondisi batas.....	57
Gambar 4.42	Pembuatan partisi pada <i>half-space</i>	58
Gambar 4.43	Hasil akhir dari pembuatan partisi pada <i>cone</i>	58
Gambar 4.44	Pembagian <i>element</i> pada <i>area</i> partisi.....	58
Gambar 4.45	Pembagian <i>element</i> pada <i>area</i> partisi	59
Gambar 4.46	Pemilihan <i>area global mesh</i>	59
Gambar 4.47	<i>Mesh control</i>	60
Gambar 4.48	<i>Edit mesh control</i>	60
Gambar 4.49	<i>Element type</i>	61
Gambar 4.50	Hasil akhir <i>mesh</i>	62
Gambar 4.51	<i>Create job</i>	62
Gambar 4.52	<i>Job manager</i>	65
Gambar 4.53	<i>Proses running / iterasi</i>	63
Gambar 4.54	<i>Query</i>	64
Gambar 4.55	<i>Probe values</i>	64
Gambar 4.56	<i>Equivalent plastic strain</i>	65
Gambar 4.57	Hasil dari simulasi.....	65
Gambar 5.1	Grafik <i>hardness</i> terhadap <i>indentation depth (h/R)</i> untuk <i>yield stress</i> $\sigma_Y/E = 0.1$	66
Gambar 5.2	Grafik <i>hardness</i> terhadap <i>indentation depth (h/R)</i> untuk <i>yield stress</i> $\sigma_Y/E = 0.01$	67
Gambar 5.3	Grafik <i>hardness</i> terhadap <i>indentation depth (h/R)</i> untuk <i>yield stress</i> $\sigma_Y/E = 0.003$	67
Gambar 5.4	Grafik <i>hardness</i> terhadap <i>indentation depth (h/R)</i> untuk <i>yield stress</i> $\sigma_Y/E = 0.0001$	68
Gambar 5.5	Grafik <i>load</i> terhadap <i>displacement</i> untuk $R = 50$ nm.....	69
Gambar 5.6	Grafik <i>load</i> terhadap <i>displacement</i> untuk $R = 400$ nm.....	70
Gambar 5.7	Grafik <i>average pressure</i> terhadap <i>indentation depth (h/R)</i> antara <i>rigid sphere (R₁)</i> dengan <i>spherical asperity (R₂)</i>	

	dan <i>spherical cavity</i> ($-R_2$)	72
Gambar 5.8	Grafik <i>recovery plastic strain loading</i> dan <i>unloading</i>	73

DAFTAR TABEL

Tabel	4.1	Koordinat model 1.....	42
Tabel	4.2	Koordinat model 2.....	44
Tabel	5.1	<i>Elastic spring back</i> untuk $R = 50$	71
Tabel	5.2	<i>Elastic spring back</i> untuk $R = 400$	71
Tabel	6.1	Nilai <i>hardness</i> maksimum dan konstan <i>hardness</i>	75

NOMENKLATUR

Simbol	Keterangan	Satuan
A	Luas permukaan kontak	[mm ²]
a	Jari-jari lingkaran permukaan kontak	[mm]
E	Modulus elastisitas	[MPa]
E_1	Modulus elastisitas benda 1	[MPa]
E_2	Modulus elastisitas benda 2	[MPa]
E^*	Modulus efektif kontak	[MPa]
F	Arah gaya gesek	[N]
F_m	Gaya gesek statis maksimum	[N]
F_s	Gaya gesek statis	[N]
F_k	Gaya gesek kinematis	[N]
H	Kekerasan material (<i>hardness</i>)	[MPa]
H_V	Kekerasan Vicker	[MPa]
N	Gaya normal	[N]
h	Kedalaman kontak	[mm]
h_b	Jarak ujung <i>indenter</i>	[mm]
h_e	<i>Recoverable elastic displacement</i>	[mm]
h_{max}	Kedalaman maksimum	[mm]
g	Grafitasi	[m/s ²]
m	Massa benda	[Kg]
n	<i>Index hardening</i>	[-]
p_m	Tekanan kontak rata-rata	[MPa]
p_e	Tekanan kontak rata-rata <i>elastic</i>	[MPa]
p_{ep}	Tekanan kontak rata-rata <i>elastic-plastic</i>	[MPa]
P	Beban	[N]
P_e	Gaya kontak <i>elastic</i>	[N]

P_{ep}	Gaya kontak <i>elastic-plastic</i>	[N]
P_c	Gaya kontak saat titik awal luluh	[N]
R^*	Radius efektif kontak	[mm]
R_1	Radius benda 1	[mm]
R_2	Radius benda 2	[mm]
R_x	Radius efektif prinsipal arah x	[mm]
R_y	Radius efektif prinsipal arah y	[mm]
V	Volume	[mm ³]
x, y	Koordinat kartesius	[mm]
α	Sudut	[°]
α'	Setengah sudut efektif <i>indenter</i>	[°]
α^*	Sudut <i>indenter</i> saat <i>residual</i>	[°]
β	Faktor koreksi	[-]
σ	<i>Yield stress</i>	[MPa]
μ_s	Koefisien gesek statis	[-]
μ_k	Koefisien gesek kinematis	[-]
τ_o	<i>Shear stress</i>	[MPa]
δ	<i>Defleksi</i>	[mm]
ν	<i>Poisson's ratio</i>	[-]
χ	Fungsi <i>exponent unloading elastic-plastic</i>	[-]
ϵ_R	<i>Strain hardening</i>	[-]
ω_{PL}	Deformasi <i>plastic</i> saat <i>loading</i>	[mm]
ω_{PU}	Deformasi <i>plastic</i> saat <i>unloading</i>	[mm]
e	<i>Elastic spring back</i>	[mm]
ω	<i>Interference</i>	[mm]