

27813/4/10



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

RSM
553.72
Nto
S-1
2009

TUGAS AKHIR – RM 1582

STUDI EKSPERIMENTAL PERBANDINGAN PENGUJIAN
INDENTASI BRINELL DAN ANALISA ELEMEN HINGGA PADA
PADUAN ALUMINIUM 7075-O

HERY PRIYO UTOMO

NRP.2106 100 514

Dosen Pembimbing :

FAHMI MUBAROK , MSc

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA 2009

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	19-8-2009
Terima Dari	H
No. Agenda Prp.	177



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT – RM 1582

**STUDY OF EXPERIMENTAL TO COMPARISON OF BRINELL
INDENTATION TEST AND FINITE ELEMENT ANALYSIS IN
ALUMINIUM ALLOY 7075-O**

HERY PRIYO UTOMO

NRP.2106 100 514

Supervisor :

FAHMI MUBAROK, ST, MSc

MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF TECHNOLOGY INDUSTRY

INSTITUTE OF SEPULUH NOPEMBER TECHNOLOGY

SURABAYA 2009

**STUDI EKSPERIMENTAL
PERBANDINGAN PENGUJIAN INDENTASI BRINELL
DAN ANALISA ELEMEN HINGGA PADA PADUAN
ALUMINIUM 7075-O**

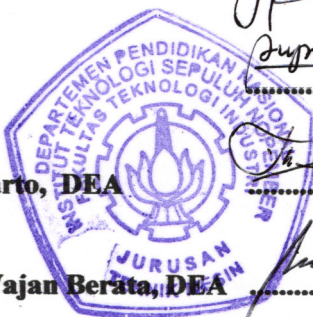
TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Metalurgi
Program Studi S – 1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Oleh
Hery Priyo Utomo
2106.100.514**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

- 1. Fahmi Mubarak ST, MSc** (Pembimbing)
- 2. Ir. Suprapti** (Penguji I)
- 3. Dr. Ir. Soeharto, DEA** (Penguji II)
- 4. Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA** (Penguji III)



**SURABAYA
Agustus, 2009**

STUDI EKSPERIMENTAL PERBANDINGAN PENGUJIAN INDENTASI BRINELL DAN ANALISA ELEMEN HINGGA PADA PADUAN ALUMINIUM 7075-O

Nama Mahasiswa : HERY PRIYO UTOMO
NRP : 2106 100 514
Jurusan : Teknik Mesin FTI - ITS
Dosen Pembimbing : FAHMI MUBAROK, ST, MSc

ABSTRAK

Di dalam dunia industri, sifat mekanik dari material biasanya ditentukan dari pengujian tarik, karena sifat mekanik material dapat lebih diketahui dari pengujian ini. Namun karena sifatnya yang merusak benda kerja yang diuji, maka kemudian dikembangkan suatu metode pengujian indentasi untuk memperoleh sifat mekanik material. Dari berbagai metode pengujian indentsi yang sering digunakan, yaitu : pengujian Brinell, pengujian Rockwell, dan pengujian Vicker. Pengujian Brinell dengan indenter bola digunakan dalam penelitian ini karena indenter bola mampu menggambarkan daerah transisi pembentukan elastik menjadi elastik – plastik saat material diberi beban.

Pada penelitian ini digunakan metode pengujian indentasi Brinell dengan indenter bola berdiameter 2,5 mm dan pemberian beban yang bervariasi. Hasil pengujian kemudian menjadi input data untuk memperoleh tegangan luluh dan tegangan maksimum. Hasil pengujian indentasi selanjutnya diverifikasi ulang dengan bantuan metode elemen hingga menggunakan ANSYS 9.0. Kedua hasil pengujian ini juga dibandingkan dengan hasil uji tarik untuk memperoleh hubungan sifat mekanik diantara pengujian tarik dan pengujian indentasi.

Dari hasil perhitungan yang dilakukan dengan pengujian indentasi Brinell dengan beban 1837,5 N diperoleh nilai

penyimpangan yang terlalu besar karena persyaratan $0,2D < d < 0,7D$ tidak terpenuhi yang menyebabkan material mengalami *sinking-in* sehingga makin besar diameter indentasinya sehingga beban yang diperbolehkan untuk pengujian pada Aluminium 7075-O yaitu 306,5N dan 612,9N. Pengujian indentasi Brinell dan dibantu simulasi pengujian dengan software Ansys 9.0 dapat digunakan untuk mendapatkan informasi awal sifat mekanik material paduan Aluminium 7075-O apabila pengujian tarik tidak memungkinkan dilakukan pada material yang jumlahnya sedikit atau dalam rangkaian komponen mesin.

Kata kunci : Pengujian indentasi Brinell, analisa elemen hingga, paduan Aluminium 7075-O

STUDY OF EXPERIMENTAL TO COMPARISON BRINELL INDENTATION TEST AND FINITE ELEMENT ANALYSIS IN ALUMINIUM ALLOY 7075-O

Name : **HERY PRIYO UTOMO**
NRP : **2106 100 514**
Majority : **Teknik Mesin FTI - ITS**
Supervisor : **FAHMI MUBAROK, ST, MSc**

ABSTRACT

In industrial world, mechanical of properties from material generally to determined from indentation test, since mechanical properties of material more known from this test. But the kind of destroy to object which tested. So that, to develop a indentation testing of methods to find mechanical properties of material. From vary test of an indentation methods often be used, for example : Brinell testing, Rockwell testing, Vicker testing, where Brinell test with ball indenter used in this research because of ball indenter, able to shown of transition of forming elastik become to elastik – plastic after material obtained to load.

In this research used a method of Brinell indentation test with spherical indenter have a diameter 2,5 mm and issue to vary of loads. Result of test, constituted of input data to obtained of yield stress and ultimate stress. After that, result of indentation test to verified with finite element method to use ANSYS 9.0. Both of test result that to compare with tensile test result to obtain relation of mechanica properties between tensile test and indentation test.

From calculation of result which done with Brinell indentation test at loading 1837,5 N obtained deviation of value is largest because of requirement $0,2D < d < 0,7D$ is not available which to cause sinking-in so that larger diameter of indentation, since load that allowanced for testing at Aluminium alloy 7075-O is 306,5 N and 612,9 N. Brinell indentation test and simulation test with ANSYS 9.0 can used to obtain early information

mechanical properties of material Aluminium alloy 7075-O if tensile test is done disable a lot of amount in material or in assembly engine of component.

Key Words : Brinell indentation test, Finite element analysis, Aluminum Alloy 7075-O

ABSTRACT

In industrial world, mechanical of properties have been generally to determined from indentation test. But mechanical properties of material were known from this test. But the kind of error to object which tested. So that to develop a indentation testing of methods to find mechanical properties of material. From very test of an indentation method often be used for example: Brinell testing, Rockwell testing, Vicker testing. Where Brinell test with ball indenter used in this research. Because of ball indenter, able to show of transition of loading elastic become to elastic-plastic after material obtained to load.

In this research used a method of Brinell indentation test with spherical indenter. Indenter diameter 2.5 mm and load in every of loads. Result of test constant of value that to obtained of yield stress and ultimate stress. After that result of indentation test to verified with finite element method to use ABAQUS 6.10. Both of test result that to compare with results test result to obtain relation of mechanical properties between tensile test and indentation test.

From calculation of result which done with Brinell indentation test at loading 144.75 N obtained deviation of value is largest because of regression $0.3D < d < 0.7D$ is not available with a to cause sinking in to then larger diameter of indentation. From that that referenced for testing of Aluminium alloy 7075-O is 280.2.2 and 612.9 N. Brinell indentation test and simulation test with ABAQUS 6.10 can used to obtain temp. deformation.

KATA PENGANTAR

Dengan memenjakatkan puji syukur kehadirat Allah SWT, Yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya, maka penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

Tugas akhir yang penulis kerjakan adalah membahas tentang **Studi Eksperimental Perbandingan Pengujian Indentasi Brinell dan Analisa Elemen Hingga Pada Paduan Aluminium 7075-O.**

Penulisan tugas akhir ini, penulis berusaha semaksimal mungkin untuk menguraikan serta menganalisa hal – hal berkaitan dengan materi penelitian untuk tugas akhir yang dilakukan oleh penulis.

Waktu pengerjaan yang dibutuhkan untuk menyelesaikan penelitian ini, penulis banyak menerima bantuan dan dukungan dari semua pihak. Adapun pihak – pihak yang berjasa membantu dalam penulisan ini, ijinlanlah penulis mengucapkan rasa terima kasih yang sebesar – besarnya kepada :

- ✓ Bapak Fahmi Mubarak, ST, MSc sebagai dosen pembimbing tugas akhir ini, yang bersedia meluangkan waktu untuk berdiskusi membahas penelitian yang penulis lakukan dan selalu memberikan saran dalam tata cara penulisan laporan TA, *Domo Arigato gozaimashita.*
- ✓ Bapak Suripto dan Ibu Munawaroh yang selama ini selalu mendukung dan membiayai kuliah untuk mendapatkan gelar Ahli madya dan Sarjana teknik, terima kasih bapak.....penulis tidak akan mengecewakan semua yang bapak berikan!!!!
- ✓ Pak Willyanto (dosen teknik mesin UK PETRA) yang bersedia mengajarkan tentang dasar-dasar penggunaan *software ANSYS.*
- ✓ Pegawai lab metalurgi antara lain, pak Mantri, pak Nandang, pak Gatot, pak Budi dan mas David yang membantu dalam menyelesaikan tugas yang berkaitan dengan kuliah di teknik Mesin ITS.

- ✓ *Mas Endro yang ada di Sidney*, tunggu penulis pasti bisa kuliah, kerja dan punya rumah disana.
- ✓ Mbak Eny dan mbak Endah yang membantu saya kuliah dan membuat penulis bersemangat dalam menyongsong masa depan.
- ✓ Teman teman tukul, pungky, erik, melon, jon, teguh, angkatan 2003, 2004 dan 2005 yang ada dilab yang membantu penulis menyelesaikan penelitian ini. Penulis tidak akan menyalahkan bantuan kalian, suatu saat penulis membutuhkan akan membutuhkan bantuan kalian untuk bekerja sama dengan penulis dalam pekerjaan.
- ✓ **Prajurit gerilya Gebang Kidul 73-75**, yaitu prof *Sarju* sebagai panglima perang, prof. *Teddy* ahli keselamatan perang, prof. *Andik* ahli internet dan anggotanya prof. *Teguh* ahli robotika, prof. *Mustoin* adalah sosok Einstein kecil, prof. *Cipto* ahli teknisi kapal perang, prof. *Faisol* ahli Las, prof. *Romi* ahli laut, prof. *Satria* dan prof. *Mahdi* ahli jaringan informasi, semua di design dengan bagus oleh ahlinya yaitu prof. *Hendra* dan manajemennya dibawah naungan Dr. Hery. Jangan menyerah oleh musuh yang akan selalu menghadang didepan kos, kobarkan semangat tak kenal menyerah (*ganbatte kudasai*).
- ✓ Untuk *Kickyo san* terima kasih telah memberikan kesempatan pada penulis agar lebih maju lagi, tidak ada yang bisa diucapkan lagi selain kata *ashiteru kickyo san*.
- ✓ Untuk semua teman – teman dan sahabat yang tidak dapat penulis sebutkan, *Domo Arigato Gozaimashita*.

Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih banyak kekurangan dan kelemahan, dalam penulisan maupun materi yang disajikan. Berdasarkan hal tersebut maka penulis mengharapkan saran – saran dari pembaca untuk menyempurnakan penelitian yang penulis lakukan untuk perkembangan selanjutnya.

Surabaya, Juli 2009

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman judul	i
Lembar pengesahan.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
Kata Pengantar.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL.....	viii
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB 2. DASAR TEORI.....	5
2.1 Definisi Sifat Mekanik.....	5
2.2 Pengujian Tarik.....	6
2.2.1 Diagram Tegangan – Regangan Teknik.....	7
2.2.2 Diagram Tegangan – Regangan Sebenarnya.....	9
2.3 Pengujian Indentasi.....	11
2.3.1 Pengujian Indentasi dengan Indentor Brinell.....	12
2.3.2 Kesalahan Pengukuran Pada Pengujian Brinell.....	14
2.3.3 Deformasi Plastik pada Pengujian Indentasi.....	15
2.3.4 Perhitungan Sifat Mekanik melalui Variasi Beban yang diberikan	18
2.3.5 Hubungan antara Tekanan Rata –Rata dan Tegangan.....	19
2.3.6 Perhitungan Strain Hardening Eksponen (n).....	21
2.3.7 Perhitungan koefisien Strain Hardening (K).....	21
2.3.8 Perhitungan Tegangan Yield dan Tegangan Ultimate untuk Paduan Aluminium.....	22
2.4 Metode Elemen Hingga.....	23
2.4.1 Permasalahan Untuk Elemen Hingga (FEA).....	23
2.4.2 Pemodelan untuk Elemen Hingga.....	25
2.4.2.1. Bidang Elemen Axisymmetry.....	25

2.4.2.2 Elemen Kontak.....	26
2.4.2.3 Pemodelan Material.....	28
2.5 Aluminium dan Paduannya.....	29
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN.....	31
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	31
3.2 Material Uji.....	33
3.3 Pembuatan Spesimen Uji.....	34
3.3.1 Spesimen Uji Tarik.....	34
3.3.2 Spesimen Uji Indentasi.....	34
3.4 Macam –Macam Pengujian.....	35
3.4.1 Uji Tarik.....	35
3.4.2 Uji Indentasi.....	36
3.5 Pengujian Indentasi dengan Basis metode Elemen Hingga.....	37
3.5.1 Pemodelan.....	37
3.5.2 Input Data.....	38
3.5.3 Membandingkan Hasil Analisa Elemen Hingga dengan Hasil Penelitian Pengujian Indentor Brinell.....	39
BAB 4. HASIL DAN ANALISA.....	41
4.1 Data pengujian tarik.....	41
4.2 Hasil pengujian indentasi.....	45
4.2.1 Data pengujian indentasi dengan indentor Brinell.....	45
4.2.2 Perbandingan diameter indentasi dan beban.....	48
4.2.3 Grafik tegangan – regangan sebenarnya.....	49
4.3 Hasil pengujian dengan metode elemen hingga.....	51
4.3.1 Hasil uji elemen hingga dengan hasil uji tarik.....	57
4.3.2 Hasil uji elemen hingga dengan hasil uji indentasi Brinell...	59
4.3.3 Perbandingan pengujian tarik dengan pengujian indentasi Brinell.....	62
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	65
5.1 Kesimpulan.....	65
5.2 Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA.....	68
LAMPIRAN	
1. Lampiran hasil pengujian tarik	69
1.1 Tabel pengujian tarik	69
2. Lampiran hasil pengujian indentasi	70

2.1	Tabel pengujian indentasi	71
3.	Lampiran pngujian elemen hingga	73
3.1	command dalam simulasi elemen hingga	73
3.2	list solution node	74

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

2.1	Bentuk Batang Uji	6
2.2	Diagram Tegangan – Regangan Teknik	8
2.3	Diagram Tegangan – Regangan Teknik dan Sebenarnya	10
2.4	Geometri Indentasi pada Pengujian Kekerasan Brinell pada (a) Logam Annealled (b) Logam Work Hardened.....	13
2.5	Ilustrasi Pengujian Indentasi dengan Indentor Brinell.....	13
2.6	(a) indenter disekitar logam yang menghasilkan piling up Untuk highly worked metal, (b) perpindahan logam terjadi pada daerah dengan jarak yang kecil dari indenter kemudian terjadi sinking in untuk annealed metals	14
2.7	Perbedaan geometry antara sinking in dan pilling up.....	14
2.8	Deformasi elastik pada permukaan datar, tegangan geser maksimum terjadi dibawah permukaan material yang terdeformasi.....	16
2.9	Deformasi plastik pada logam ideal plastik dengan indenter bola (a) daerah z dimana terjadi pada kondisi $P_m = 1,1Y$, (b) kondisi keseluruhan material disekeliling indenter terjadinya aliran plastis.....	17
2.10	Geometri indentasi pada permukaan (a) rigid cone (b) rigid sphere	17
2.11	Perhitungan tekanan rata – rata diantara indenter bola dan indentasi	18
2.12	Kondisi batas untuk model struktural	24
2.13	Ilustrasi Pemodelan untuk Pengujian Indentasi.....	24
2.14	Model ANSYS	25
2.15	(a) PLANE42 (b) PLANE82	26
2.16	Ilustrasi Proses Kontak pada Elemen Hingga.....	27
2.17	(a) CONTA 175 (b) TARGE169	28
2.18	Model material dengan isotropic hardening	29
3.1	Diagram Alir Penelitian	31

3.2	Diagram Alir Pengujian dengan Metode Elemen Hingga.....	32
3.3	Spesimen Uji Tarik	34
3.4	Spesimen Uji Indentasi	35
3.5	Spesimen Uji Indentasi	35
3.6	Alat Uji Tarik	36
3.7	(a) Alat Uji Indentasi; (b) proses pengujian indentasi Brinell	36
3.8	Model dari ANSYS pengujian indentasi dengan $\frac{1}{4}$ model.....	37
4.1	Kurva Tegangan – Regangan sebenarnya hasil pengujian tarik....	44
4.2	Diameter indentasi pada pengujian indentasi dengan indenter Brinell dengan beban 306,5 N (31,2 kgf)	47
4.3	Diameter indentasi pada pengujian indentasi dengan indenter Brinell dengan beban 612,9 N (62,5 kgf).....	47
4.4	Diameter indentasi pada pengujian indentasi dengan indenter Brinell dengan beban 1837,5 N (187,5 kgf)	48
4.5	Diameter indentasi terhadap beban indentasi untuk diameter indenter 2,5 mm.....	49
4.6	Tegangan – regangan sebenarnya pengujian indentasi pada diameter indenter 2,5 mm	51
4.7	Perbandingan beban dan dia. Indentasi untuk diameter indenter 2,5 mm.....	53
4.8	Perpindahan node untuk beban indentasi, (a) 306.5 N (31.2 kgf) (b) 612.9 N (62.5 kgf) (c) 1837.5 N (187.5 kgf)	54
4.9	Distribusi tegangan Von Mises untuk beban indentasi, (a) 306.5 N (31.2 kgf) (b) 612.9 N (62.5 kgf) (c) 1837.5 N (187.5 kgf)	55
4.10	Distribusi regangan plastic equivalent untuk beban indentasi, (a) 306.5 N (31.2 kgf) (b) 612.9 N (62.5 kgf) (c) 1837.5 N (187.5 kgf)	56
4.11	Perbandingan tegangan – regangan untuk pengujian tarik dan pengujian elemen hingga dengan diameter indenter 2.5 mm.....	57
4.12	Perbandingan tegangan – regangan untuk pengujian indentasi Brinell dan pengujian elemen hingga dengan diameter indenter 2,5 mm.....	60
4.13	Perbandingan tegangan – regangan untuk pengujian tarik dan pengujian indentasi Brinell dengan diameter indenter 2,5 mm...	63

DAFTAR TABEL

1	Macam – macam pengujian indentasi	12
2	Harga c untuk masing – masing logam work hardened	20
3	Paduan Aluminium	30
1	Komposisi kimia Aluminium 7075	33
2	Sifat Mekanik Aluminium 7075-O	33
1	Data Pengujian Tarik.....	42
2	Hasil Pengujian Tarik.....	45
3	Hasil pengujian indentasi dengan indentor Brinell.....	46
4	Hasil pengujian menggunakan metode elemen hingga.....	52
5	Perbandingan pengujian tarik dengan pengujian elemen hingga.....	58
6	Hasil pengujian indentasi dengan elemen hingga dan pengujian Brinell	61
7	Perbandingan hasil pengujian tarik dan pengujian indentasi dengan indentor Brinell	64

DAFTAR PUSTAKA

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sifat mekanik suatu material adalah suatu karakter dari material yang meliputi respon elastis dan respon plastis saat material tersebut diberikan suatu beban atau gaya. Sifat ini sangat perlu diketahui agar perancangan suatu komponen dapat dilakukan secara tepat dan aman. Beberapa sifat mekanik yang penting diketahui adalah modulus elastis, kekuatan luluh, kekuatan tarik, dan sebagainya. Pada umumnya sifat mekanik ini diperoleh dari pengujian tarik menurut standar JIS atau ASTM, namun pengujian tarik ini mempunyai beberapa kelemahan seperti, sifatnya yang merusak serta membutuhkan waktu persiapan spesimen yang relatif lama. Oleh karena itu diperlukan suatu metodologi alternatif yang digunakan untuk menghasilkan sifat mekanik yang lebih cepat dan relatif akurat. Pengujian indentasi menjadi salah satu alternatif yang lebih berpotensi, karena metode ini mudah dilakukan dan dapat dilakukan pengujian secara berulang – ulang pada suatu spesimen yang sama. Hasil pengujian yang berupa beban penekanan (indentasi) dan diameter indentasi dapat digunakan sebagai input data untuk menghitung sifat mekanik.

Pengujian indentasi dapat dibedakan berdasarkan bentuk dan jenis indentornya, beberapa pengujian indentasi yang sering digunakan antara lain : pengujian Brinell yang menggunakan indentor berbentuk bola baja yang dikeraskan atau tungsten karbida, pengujian Rockwell menggunakan indentor kerucut dan bola dan pengujian Vicker, indentor yang digunakan berbentuk piramida. Masing – masing pengujian ini memiliki kelebihan dan

kekurangan terutama dalam penentuan daerah elastis dan daerah plastis sehingga penentuan daerah tadi kemudian sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik yang dapat menggambarkan karakter dari material. Pengujian Brinell dengan indenter berbentuk bola akan menunjukkan karakter yang menggambarkan terjadinya peralihan dari deformasi elastis menjadi deformasi plastis dengan lebih akurat dibanding pengujian indentasi yang lain sehingga dalam penelitian ini metode pengujian indentasi dengan indenter Brinell yang digunakan.

Untuk memperoleh hasil sifat mekanik yang lebih akurat dan relatif mendekati yang umum diperoleh pada pengujian tarik, maka verifikasi hasil pengujian indentasi perlu dilakukan dengan bantuan analisa elemen hingga.

Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian indentasi dengan elemen hingga pada paduan aluminium 7075-O, kemudian hasil pengujian indentasi dengan analisa elemen hingga menggunakan *software ANSYS 9.0* diverifikasi dengan hasil pengujian indentasi dengan indenter Brinell. Sifat mekanik yang diperoleh dari hasil uji indentasi dan perhitungan dari metode elemen hingga kemudian dibandingkan dengan sifat mekanik yang diperoleh dari hasil pengujian tarik.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun beberapa hal yang menjadi permasalahan dalam proses penelitian ini antara lain :

1. Apakah pengujian indentasi menggunakan indenter Brinell dapat menghasilkan sifat mekanik yang dapat mendekati sifat mekanik yang diperoleh dengan pengujian tarik?
2. Dengan pendekatan metode elemen hingga, apakah hasil sifat mekanik yang diperoleh dari simulasi aluminium 7075-O akan mampu mendekati hasil dari pengujian indentasi dan pengujian tarik?

1.3. Batasan Masalah

Agar penelitian yang dilakukan tidak menyimpang dari topik bahasan, maka diperlukan pembatasan masalah yang meliputi :

1. Pemberian beban diantara pengujian menggunakan metode elemen hingga dan pengujian indentasi dengan indenter Brinell dianggap sama.
2. Strukturmikro dari Aluminium 7075-O kondisi annealed dianggap homogen.
3. Besarnya gesekan pada saat indenter menyentuh permukaan spesimen uji diabaikan.
4. Kekasaran permukaan dari setiap titik indentasi pada spesimen yang diuji diasumsikan sama.
5. Pemodelan spesimen untuk kasus pengujian indentasi dilakukan dengan model seperempat bagian dikarenakan adanya kesimetrisan model pada dua arah sumbu simetri.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan yang hendak dicapai dari pengerjaan tugas akhir ini antara lain :

1. Mengetahui perbandingan antara pengujian indentasi menggunakan indenter Brinell dan pengujian indentasi menggunakan metode elemen hingga.
2. Memperoleh karakter sifat mekanik dari pengujian indentasi dengan indenter Brinell kemudian membandingkan hasilnya dengan sifat mekanik yang diperoleh dari pengujian tarik untuk aluminium 7075-O.
3. Sebagai alternatif pengujian untuk mendapatkan sifat mekanik dengan cepat dan tanpa harus merusak material.

1.5. Manfaat Penelitian

Beberapa hal yang bisa dijadikan manfaat dalam proses pengujian kekerasan dan pengujian tarik Aluminium 7075 -O antara lain :

1. Memperoleh hubungan antara pengujian dengan metode elemen hingga dengan ANSYS untuk kasus dengan penekan berbentuk bola dengan pengujian indentasi dengan metode Brinell.
2. Membuktikan bahwa dari pengujian indentasi dengan metode Brinell dapat diperoleh sifat mekanik yang mendekati sifat mekanik yang dihasilkan oleh pengujian tarik untuk material aluminium 7075 -O.

- ### 1.4. Tujuan Penelitian
- Tujuan yang hendak dicapai dari penelitian tugas akhir ini antara lain :
1. Mengetahui perbandingan antara pengujian indentasi menggunakan indenter Brinell dan pengujian indentasi menggunakan metode elemen hingga.
 2. Memperoleh karakter sifat mekanik dari pengujian indentasi dengan indenter Brinell kemudian membandingkan hasilnya dengan sifat mekanik yang diperoleh dari pengujian tarik untuk aluminium 7075-O.
 3. Sebagai alternatif pengujian untuk mendapatkan sifat mekanik dengan cepat dan tanpa merusak material.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Definisi sifat mekanik

Sifat mekanik adalah sifat yang menunjukkan respon elastis dan plastis pada suatu material saat material tersebut diberi beban atau gaya [5]. Sifat mekanik sering digunakan sebagai input data awal dari suatu material sebelum material tersebut mengalami proses lebih lanjut. Adapun beberapa sifat mekanik yang penting antara lain : kekuatan, kekerasan, *elastiscity*, *plasticity* dan sebagainya.

Untuk mengetahui atau mengukur sifat mekanik suatu logam perlu dilakukan pengujian. Pengujian biasanya dilakukan terhadap contoh (*sample*) material yang dipersiapkan menjadi spesimen atau batang uji (*test piece*) dengan bentuk dan ukuran yang standar. Demikian juga prosedur pengujian harus dilakukan dengan mengikuti suatu standar tertentu, dari hasil pengukuran pengujian tersebut dilakukan suatu pengolahan data kemudian diperoleh sifat - sifat mekanik material yang diuji.

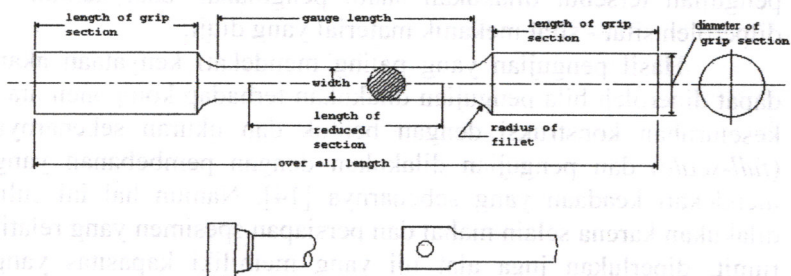
Hasil pengujian yang paling mendekati kenyataan akan dapat diperoleh bila pengujian dilakukan terhadap komponen atau keseluruhan konstruksi dengan bentuk dan ukuran sebenarnya (*full-scale*) dan pengujian dilakukan dengan pembebanan yang mendekati keadaan yang sebenarnya [14]. Namun hal ini sulit dilakukan karena selain mahal dan persiapan spesimen yang relatif rumit, diperlukan juga alat uji yang memiliki kapasitas yang sangat besar jika material yang diuji memiliki dimensi yang besar. Untuk itulah standar pengujian umumnya mencantumkan spesifikasi spesimen dengan dimensi yang relatif kecil namun tetap

dapat memberikan hasil yang mewakili sifat mekanik pada kondisi sebenarnya.

Beberapa pengujian mekanik yang banyak digunakan adalah pengujian tarik, pengujian kekerasan, pengujian kelelahan dan beberapa pengujian lainnya. Masing – masing pengujian akan menunjukkan sifat material dengan kecenderungan berbeda – beda sesuai dengan tipe beban yang diberikan. Untuk mendapatkan sifat mekanik dari suatu material, dilakukan pengujian tarik yang sesuai dengan standar JIS, ASM, atau ASTM umum dilakukan.

2.2 Pengujian tarik

Pengujian tarik biasanya dilakukan terhadap batang/spesimen uji yang standar. Bahan yang akan diuji tarik, dibuat sesuai dengan suatu standar pengujian. Salah satu bentuk standar batang uji dapat dilihat pada gambar 2.1. Pada bagian tengah dari batang uji merupakan bagian yang menerima tegangan yang seragam, dan dinamakan *gauge length* yaitu bagian yang dianggap menerima pengaruh dari pembebanan, dan pada bagian ini selalu diukur panjangnya selama proses pengujian [4].



Gambar 2.1 Bentuk batang uji tarik [15]

2.2.1 Diagram tegangan-regangan teknik

Proses penarikan material uji setiap saat tercatat dengan grafik yang tersedia dalam mesin uji tarik, besarnya gaya tarik yang bekerja dan besarnya pertambahan panjang yang terjadi sebagai akibat dari proses penarikan tersebut. Penarikan pada spesimen uji berlangsung secara terus - menerus sampai batang/spesimen uji putus.

Data hasil proses penarikan pada batang/spesimen uji yang diperoleh dari mesin uji tarik berupa grafik beban penarikan -pertambahan panjang (grafik $P-\Delta l$). Grafik tersebut belum menggambarkan kemampuan batang uji untuk menerima beban atau gaya penarikan sebenarnya. Untuk menggambarkan sifat dari material sebenarnya secara umum maka grafik $P-\Delta L$ harus dijadikan grafik tegangan-regangan [4].

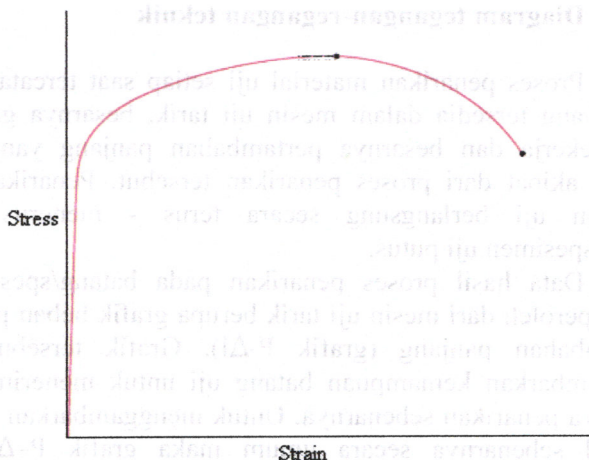
Pada saat batang/spesimen uji menerima beban sebesar P kg maka batang/spesimen uji akan bertambah panjang sebesar ΔL mm. Pada saat itu pada penarikan batang/spesimen uji bekerja suatu tegangan yang besarnya

$$\sigma_{\text{teknik}} = \frac{P}{A_0} \dots\dots\dots (2.1)$$

dan pada saat batang uji bekerja tegangan, dalam batang uji terdapat penambahan panjang yang menyebabkan batang/spesimen uji mengalami regangan yang besarnya

$$\epsilon_{\text{teknik}} = \frac{\Delta l}{l_0} \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana Δl adalah perubahan panjang, A_0 adalah luas penampang awal dari spesimen dan l_0 adalah panjang awal spesimen. Tegangan-regangan yang terjadi pada batang/spesimen uji digambarkan dalam grafik tegangan-regangan pada gambar 2.2 dibawah.



Gambar 2.2 Grafik tegangan – regangan teknik [15]

Gambar 2.2, merupakan salah satu bentuk diagram tegangan – regangan. Pada waktu pengujian tarik dilakukan dengan penambahan beban secara perlahan-lahan akan terjadi pertambahan panjang yang sebanding dengan penambahan gaya yang bekerja. Kesebandingan ini berlangsung terus sampai beban mencapai titik *proporsional*, setelah itu penambahan panjang yang terjadi akibat penambahan beban tidak lagi berbanding lurus, pertambahan beban yang sama akan menghasilkan pertambahan panjang yang lebih besar sehingga suatu saat akan terjadi penambahan panjang tanpa ada penambahan beban, batang uji bertambah panjang dengan sendirinya. Dimana batang uji mengalami *yield*. Kenaikan beban ini akan berlangsung terus sampai suatu maksimum, pada saat beban mencapai maksimum pada batang uji terjadi pengecilan (*necking*) penampang, dan pertambahan panjang hanya terjadi pada pengecilan (*necking*) penampang tersebut. Peristiwa ini hanya terjadi pada logam yang

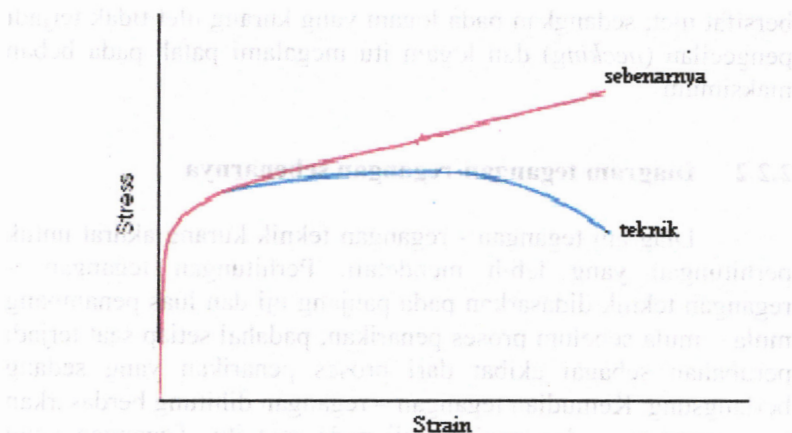
bersifat ulet, sedangkan pada logam yang kurang ulet tidak terjadi pengecilan (*necking*) dan logam itu mengalami patah pada beban maksimum.

2.2.2 Diagram tegangan-regangan sebenarnya

Diagram tegangan - regangan teknik kurang akurat untuk perhitungan yang lebih mendetail. Perhitungan tegangan - regangan teknik didasarkan pada panjang uji dan luas penampang mula - mula sebelum proses penarikan, padahal setiap saat terjadi perubahan sebagai akibat dari proses penarikan yang sedang berlangsung. Kemudian tegangan - regangan dihitung berdasarkan luas penampang dan panjang uji pada saat itu. Tegangan yang terjadi sebenarnya didefinisikan sebagai ratio beban penarikan pada spesimen terhadap luas penampang yang bisa ditahan akibat beban itu [4]. Tegangan sebenarnya dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\sigma = \frac{P}{A_1} \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana σ adalah tegangan sebenarnya, P adalah beban yang diberikan pada spesimen, A_1 adalah luas penampang minimum yang dapat menahan beban P .



Gambar 2.3 Grafik tegangan-regangan teknik dan sebenarnya [15]

Regangan sebenarnya didefinisikan sebagai integral rasio pada perubahan penambahan panjang terhadap panjang awal spesimen [3] dinyatakan dalam,

$$\varepsilon = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana l_0 adalah panjang awal, l_i adalah panjang saat diberi beban, berdasarkan integral persamaan diatas diperoleh :

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l_i}{l_0}\right) \dots\dots\dots (2.5)$$

Ada beberapa persamaan matematis yang digunakan untuk menyatakan hubungan tegangan – regangan. Salah satunya persamaan yang dianggap *representative* untuk bahan teknik adalah [3] :

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.6)$$

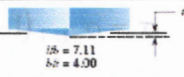
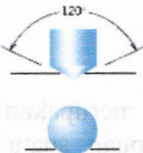
dimana ε adalah regangan sebenarnya, σ adalah tegangan sebenarnya, K adalah *konstanta work hardening*, n adalah *exponent work hardening*. Hubungan diantara kurva tegangan-regangan teknik dan kurva tegangan-regangan sebenarnya didapatkan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \ln(1 + \varepsilon_t) \\ \sigma &= \sigma_{\text{teknik}}(1 + \varepsilon_t) \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.3 Pengujian indentasi

Pengujian indentasi merupakan pengujian yang digunakan untuk mengetahui kemampuan suatu material untuk menahan indentasi/penetrasi. Adapun beberapa cara pengujian yang standar yang digunakan untuk menguji material yaitu pengujian Brinell, pengujian Rockwell, pengujian Vickers dan lain – lain. Tabel 2.1 menunjukkan macam – macam pengujian yang paling sering digunakan. Perbedaan antara pengujian Brinell, pengujian Rockwell, pengujian Vickers apabila ditinjau dari bentuk indentornya adalah pengujian Brinell menggunakan bola baja yang dikeraskan sebagai indentor, pengujian rockwell digunakan indentor berbentuk kerucut intan dan bola baja sesuai dengan material yang akan diuji, sedangkan pengujian Vickers digunakan indentor berbentuk piramid yang alasnya berupa bujur sangka dan sudut puncak antara sudut yang berhadapan yaitu 136° [15]. Pengujian yang sering digunakan adalah pengujian Brinell.

Tabel 2.1 Macam – macam pengujian indentasi [15]

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load
		Side View	Top View	
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P
Rockwell and Superficial Rockwell	Diamond cone, $\frac{1}{8}, \frac{1}{16}, \frac{1}{32}$ in diameter steel spheres			60 kg } Rockwell 100 kg } 150 kg } 15 kg } Superficial Rockwell 30 kg } 45 kg }

2.3.1 Pengujian Indentasi dengan Indentor Brinell

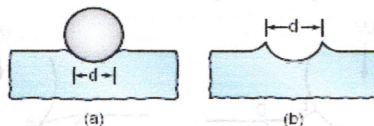
Pengujian Brinell adalah salah satu jenis pengujian indentasi yang banyak digunakan. Pengujian ini menggunakan bola baja yang dikeraskan sebagai indenter. Indentor ini dibebankan ke permukaan logam yang diuji dengan beban atau gaya tekan tertentu selama waktu tertentu (10 – 30 detik). Kekerasan Brinell dihitung berdasarkan diameter indentasinya. Dan dirumuskan sebagai berikut :

$$BHN = \frac{\text{gaya tekan}}{\text{luas tapak tekan(indentasi)}} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$BHN = \frac{P}{\pi \frac{D}{2} \left\{ D - \sqrt{D^2 - d^2} \right\}}$$

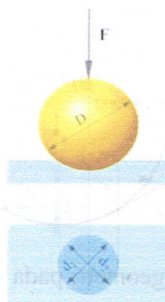
dimana P (F) adalah gaya tekan, D adalah diameter dari bola indentor, dan d adalah diameter indentasi akibat gaya tekan sebesar P .

Pengukuran diameter indentasi didalam pengujian indentasi dengan indentor Brinell harus diperhatikan fenomena yang terjadi dalam spesimen uji. Fenomena pada pengujian ini banyak tergantung pada kondisi perlakuan yang diberikan pada material yang akan diuji, gambar 2.4 menunjukkan geometri indentasi yang diperoleh untuk logam *annealed* dan *work hardened*.



Gambar 2.4 Geometri indentasi pada pengujian kekerasan Brinell pada : (a) logam *annealed* (b) logam *work hardened* [15]

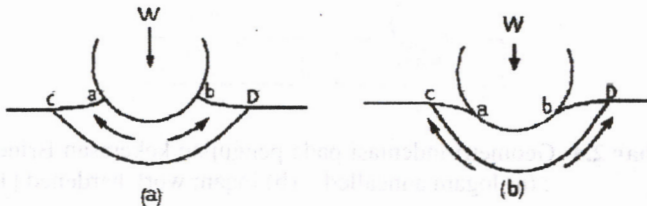
Penentuan diameter indentasi pada pengujian Brinell dapat dilihat pada gambar 2.5 yang menunjukkan pengukuran diameter indentasi yang dihasilkan dari simulasi pengujian indentasi dengan indentor Brinell.



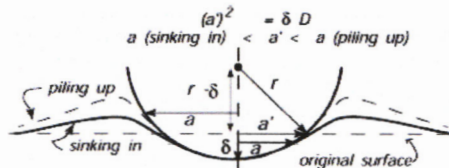
Gambar 2.5 Ilustrasi pengujian indentasi dengan indentor Brinell [10]

2.3.2 Kesalahan pengukuran pada pengujian Brinell

Fenomena *pilling up* dan *sinking in* pada pengujian Brinell sering terjadi pada material uji dengan kondisi perlakuan yang berbeda pada material tersebut sehingga fenomena tersebut dapat menyebabkan kesalahan dalam pengukuran diameter indentasi pada pengujian Brinell. *Sinking in* terjadi pada logam dalam kondisi *annealed* dan *pilling up* terjadi pada logam yang terdeformasi dingin. Gambar 2.6 dan gambar 2.7 menunjukkan terjadinya fenomena "*pilling up*" dan "*sinking in*"[16].



Gambar 2.6 (a) indenter disekitar logam yang menghasilkan piling up untuk highly worked metal, (b) perpindahan logam terjadi pada daerah dengan jarak yang kecil dari indenter kemudian terjadi sinking in untuk logam dalam kondisi annealed[2]



Gambar 2.7 Perbedaan geometri pada sinking in dan pilling up [16]

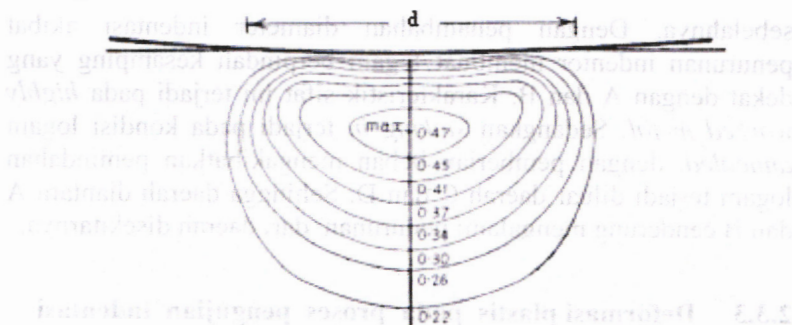
Pilling up terjadi ketika beban diberikan pada spesimen melalui penetrasi pada indenter, logam akan mengalir keluar diantara AC dan BD sehingga daerah ini akan terangkat dari

sebelahnya. Dengan penambahan diameter indentasi akibat penurunan indenter membuat logam berpindah kesamping yang dekat dengan A dan B. Karakteristik sifat ini terjadi pada *highly worked metal*. Sedangkan *sinking in* terjadi pada kondisi logam *annealed*, dengan pemberian beban mengakibatkan pemindahan logam terjadi diluar daerah C dan D. Sehingga daerah diantara A dan B cenderung mengalami penurunan dari daerah disekitarnya.

2.3.3 Deformasi plastis pada proses pengujian indentasi

Berdasarkan kriteria *Von Misses* dan *Tresca* untuk pengujian indentasi bahwa kondisi plastis pada material terjadi pada titik tepat dibawah permukaan kontak antara indenter dan material[2]. Ditunjukkan dalam gambar 2.8 nilai maksimum terjadi pada titik kira – kira $0.5d$ dibawah pusat dari lingkaran kontak. Nilai tegangan geser pada titik ini tidak selalu tergantung pada nilai poison rasio, tetapi kebanyakan material yang mempunyai poison rasio 0,3 mempunyai nilai tegangan geser $0.47P_m$, sedangkan P_m adalah tekanan rata – rata pada lingkaran kontak. Oleh karena itu, kedua kriteria *Von Mises* dan *Tresca* menyatakan bahwa aliran plastis terjadi saat tegangan geser sama dengan $0.5Y$, sehingga terdapat hubungan $0.47P_m = 0.5Y$. Ini berarti bahwa deformasi plastis akan terjadi pada daerah dimana ;

$$P_m \approx 1.1Y \dots \dots \dots (2.9)$$

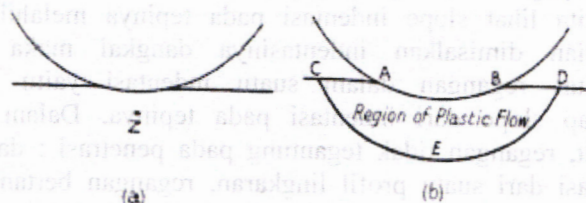


Gambar 2.8 Deformasi elastik pada permukaan datar, tegangan geser maksimum terjadi dibawah permukaan material yang terdeformasi [2]

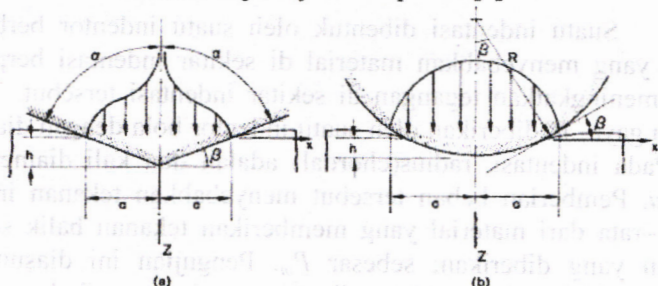
Apabila tekanan rata – rata kurang dari persyaratan ini, deformasi elastis saat penarikan beban menyebabkan permukaan dan indenter kembali ke bentuk semula. Meskipun beberapa deformasi plastis terjadi pada daerah z seperti pada gambar 2.9.a, saat pemindahan beban jumlah deformasi sisa sangat kecil[2].

Dengan bertambahnya beban indenter, jumlah dari deformasi disekitar indentasi akan bertambah kemudian tekanan rata – rata akan naik secara *steady* sampai material disekitar indentasi dalam kondisi plastis terlihat dalam gambar 2.9b. Untuk mendefinisikan kondisi yang terjadi tersebut sangat sulit sehingga dilakukan pendekatan yang paling sederhana adalah untuk menyatakan bahwa kondisi tersebut dapat tercapai apabila variasi tekanan *yield* meningkat terhadap ukuran indentasinya. Dalam kondisi ini sangat sulit dalam mendefinisikan kondisi *fully plastic* yang juga tidak bisa dipisahkan dengan proses secara teoritis. Dengan asumsi bahwa kondisi *fully plastic* dapat tercapai apabila garis slip pada bidang plastis menutupi daerah disekitar indenter sehingga analisa secara teoritis untuk kondisi *fully plastic* cukup

sulit dilakukan karena permasalahan secara simetris aksial saat ini sulit diatasi.



Gambar 2..9 Deformasi plastik pada logam ideal plastik dengan indenter bola (a) daerah z dimana terjadi pada kondisi $P_m = 1,1Y$, (b) kondisi keseluruhan material disekeliling indenter terjadinya aliran plastis [2]



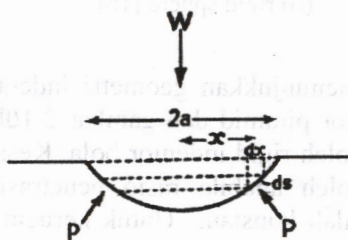
Gambar 2.10 Geometri indentasi pada permukaan (a) rigid cone (b) rigid sphere [16]

Gambar 2.10a menunjukkan geometri indentasi yang dihasilkan oleh rigid indenter piramid dan gambar 2.10b geometri indentasi yang dihasilkan oleh rigid indenter bola. Kesamaan bentuk secara geometris diperoleh apabila rasio penetrasi terhadap setengah lebarnya h/a adalah konstan. Untuk kerucut dan piramid, $h/a = \tan \beta = \text{konstan}$, oleh karena itu regangan $(x/a, y/a)$ adalah konstan dan tidak tergantung pada kedalaman indentasi. Jika β kecil, regangan kecil dan berbanding lurus dengan rasio h/a . Oleh karena

itu, bahwa distribusi tegangan ($x/a, y/a$) dan tekanan kontak rata – rata P_m juga tidak tergantung pada kedalaman dari indentasinya. Jika kita lihat slope indentasi pada tepinya melalui sudut β , kemudian dimisalkan indentasinya dangkal maka β kecil. Intensitas regangan dalam suatu indentasi yaitu sebanding terhadap slope dari indentasi pada tepinya. Dalam indentasi kerucut, regangan tidak tergantung pada penetrasi : dalam suatu indentasi dari suatu profil lingkaran, regangan bertambah yang arahnya menyesuaikan ukuran radius indentasi a [16].

2.3.4 Perhitungan sifat mekanik melalui variasi beban yang diberikan

Suatu indentasi dibentuk oleh suatu indenter berbentuk bola yang menyebabkan material di sekitar indentasi berpindah dan meningkatkan tegangan di sekitar indentasi tersebut. Tinjau suatu gaya, W diberikan oleh suatu indenter bola dengan diameter D . Pada indentasi, radius(chordal) adalah dua kali diameternya $d=2a$. Pemberian beban tersebut menyebabkan tekanan internal rata – rata dari material yang memberikan tekanan balik sebesar beban yang diberikan, sebesar P_m . Pengujian ini diasumsikan bahwa tidak ada gesekan diantara permukaan indenter dan indentasi tersebut [2].



Gambar 2.11 Perhitungan tekanan rata – rata untuk indenter bola pada proses indentasi [2]

Suatu indentasi akibat proses pembebanan dari indenter bola dapat terlihat pada gambar 2.11. berdasarkan gambar tersebut, maka tekanan rata – rata dapat ditentukan dengan melihat hubungan antara radius x dan lebar ds . Luasan permukaan pada indentasi yaitu $2\pi x ds$ serta gaya adalah $P_m 2\pi x ds$. Sesaat komponen gaya horisontal adalah nol pada saat komponen vertikal mempunyai nilai $P_m 2\pi x dx$. Sehingga diperoleh daerah permukaan pada indentasi, resultan gaya vertikalnya sama dengan W , didapatkan melalui (*Tabor's Formula*) :

$$w = \int_0^a P_m 2\pi x dx \dots\dots\dots (2.10)$$

$$= P_m \pi a^2$$

sehingga diperoleh tekanan rata – rata :

$$P_m = \frac{w}{\pi a^2} \dots\dots\dots (2.11)$$

dimana W adalah beban yang diberikan dalam N sedangkan a adalah radius indentasi dalam mm .

2.3.5 Hubungan antara tekanan rata – rata dan tegangan

Percobaan indentasi yang dilakukan oleh *Tabor* dimaksudkan untuk mengukur tegangan yang terdapat didalam maupun diluar material yang terdeformasi akibat indentasi.

Hasil percobaan *Tabor* menunjukkan bahwa terjadi kenaikan tegangan pada material yang relatif konstan didaerah tepi indentasi seiring dengan bertambahnya beban penekanan.

Perhitungan secara empiris oleh *Tabor* memperlihatkan bahwa kondisi tegangan pada tepian atau dipinggir indentasi dapat digunakan untuk mengukur 'tegangan representative' yang mewakili seluruh tegangan yang terjadi pada material akibat deformasi akibat indentasi.

Percobaan *Tabor* yang dilakukan untuk berbagai jenis material menunjukkan bahwa tekanan rata – rata sebanding dengan tegangan yang terdapat pada proses indentasi melalui hubungan [6] :

$$\begin{aligned} P_m &\approx \sigma \\ P_m &= c \sigma \end{aligned} \quad \text{..... (2.12)}$$

Tabel 2.2 Harga c untuk masing – masing logam work hardened[2]

Metal (Work-hardened)	Y (kg./mm. ²)	P_m (kg./mm. ²)	$c = P_m/Y$
Tellurium-lead alloy .	2.1	6.1	2.9
Aluminium . . .	12.3	34.5	2.8
Copper	31	88	2.8
Mild steel	65	190	2.8

harga c ditentukan dari tabel 2.2 untuk Aluminium adalah 2.8 sehingga diperoleh persamaan :

$$P_m = 2.8\sigma \quad \text{..... (2.13)}$$

dimana P_m adalah tekanan rata – rata sedangkan σ adalah tegangan pada indentasi.

Selain menganalisa tegangan akibat indentasi pada material yang terdeformasi, regangan yang terjadi juga ternyata sebanding dengan rasio d/D , dimana d adalah diameter hasil indentasi dan D adalah diameter dari indenter [6] melalui

$$\varepsilon = \psi x \left(\frac{d}{D} \right) \quad \text{..... (2.14)}$$

berdasarkan percobaan *Tabor* [2], harga ψ sebesar 0.2 sehingga regangan didapatkan,

$$\varepsilon = 0.2 x \left(\frac{d}{D} \right) \quad \text{..... (2.15)}$$

2.3.6 Perhitungan strain hardening exponent (n)

Semua titik pada daerah plastis dalam kurva tegangan – regangan pada material dihubungkan melalui persamaan $\sigma_i = K \varepsilon_i^n$, dimana n adalah eksponen strain hardening dan K adalah koefisien strain hardening [6]. Dua data $(\sigma_1, \varepsilon_1)$ dan $(\sigma_2, \varepsilon_2)$ dapat diperoleh dari percobaan indentasi pada material dengan kondisi penekanan yang berbeda. Tegangan dan regangan ini dapat dihubungkan melalui persamaan [5]:

$$\sigma_1 = K \varepsilon_1^n \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

$$\sigma_2 = K \varepsilon_2^n$$

dari persamaan diatas diperoleh :

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)^n$$

persamaan untuk memperoleh n dilakukan dengan fungsi $\ln$ yaitu

$$\ln \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right) = n \times \ln \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right) \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

$$n = \frac{\ln \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)}{\ln \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)}$$

2.3.7 Perhitungan koefisien strain hardening (K)

Perhitungan koefisien *strain hardening* pada material diperoleh dari beban yang berbeda. Kemudian tegangan dan regangan dihubungkan dengan nilai n dari $(\sigma_1, \varepsilon_1)$ dan $(\sigma_2, \varepsilon_2)$.

Harga koefisien *strain hardening* K diperoleh dari [5]:

$$1. K_1 = \frac{\sigma_1}{\epsilon_1^n}$$

$$2. K_2 = \frac{\sigma_2}{\epsilon_2^n}$$

3. K adalah rata-rata pada K_1 dan K_2 menjadi

$$K = \frac{K_1 + K_2}{2} \quad (2.18)$$

2.3.8 Perhitungan tegangan yield (σ_y) dan tegangan ultimate (σ_u) untuk paduan Aluminium

Pengujian indentasi adalah metode alternatif yang relatif mudah dan cepat untuk mengestimasi sifat mekanik pada logam (material). Secara umum *Tabor* dalam bukunya [2], menyatakan hubungan empirik antara UTS dengan pengujian indentasi pada berbagai logam dan paduannya. Metode ini kemudian dikembangkan oleh *Cahoon* [12] untuk mencari tegangan luluh pada baja dengan indentasi. Selanjutnya *Hawk* [13] melakukan penelitian untuk memperoleh tegangan luluh dan tegangan maksimum pada Aluminium dan paduannya melalui uji indentasi dengan melihat hasil nilai kekerasan yang diperoleh :

$$\sigma_u = \frac{H}{2.9} \left[1 - n \left(\frac{12.5n}{1 - n} \right)^n \right] \quad (2.19)$$

$$\sigma_y = \frac{H}{(3.0 \pm 0.1)} B^n \quad \text{atau} \quad \sigma_y = \frac{H}{3} \quad (2.20)$$

dimana H adalah nilai kekerasan dari Brinell, B adalah konstanta yang tergantung pada material, dan n adalah *strain hardening coefficient*.

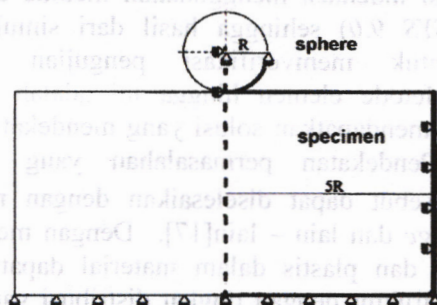
2.4 Metode elemen hingga

Perhitungan tegangan dan regangan dapat pula dilakukan dengan simulasi indentasi menggunakan metode elemen hingga (*software ANSYS 9.0*) sehingga hasil dari simulasi ini dapat digunakan untuk memverifikasi pengujian - pengujian sebelumnya. Metode elemen hingga ini adalah suatu metode numerik untuk mendapatkan solusi yang mendekati pada kondisi yang ideal. Pendekatan permasalahan yang *steady state*, pendekatan tersebut dapat diselesaikan dengan metode *Euler*, metode *Lagrange* dan lain - lain [17]. Dengan metode ini suatu struktur elastis dan plastis dalam material dapat diperlihatkan dalam bentuk struktur dengan tingkat distribusi yang diinginkan, seperti distribusi tegangan, distribusi regangan plastis, perpindahan titik (*node displacement*). Metode ini memudahkan dalam menganalisa sifat mekanik dari material. Metode yang digunakan untuk menganalisa yaitu material dibagi - bagi (*discretized*) menjadi beberapa substruktur (disebut elemen). Setiap elemen bisa dibagi menjadi 4, 8 node dan sebagainya. Dari setiap node terdapat 2, 3 DOF (*Degree of Freedom*) [1]. Perpindahan dari tiap titik (*node*) akan dihubungkan dengan pembebanan, sifat mekanik material (*mechanical properties material*), sifat geometrik (*geometric property*) dan lain - lain. Metode elemen hingga telah digunakan secara luas untuk menyelesaikan berbagai persoalan mekanika dengan geometri yang kompleks. Metode elemen hingga dalam hal ini digunakan untuk menganalisa struktur dari material yang dikenai beban penekanan (*indentasi*).

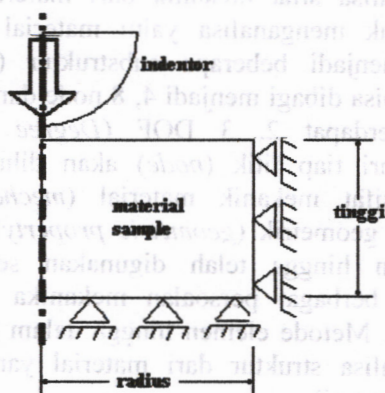
2.4.1 Permasalahan untuk elemen hingga (Finite Element Analysis)

Gambar 2.12 menunjukkan kondisi batas yang diambil pada material uji untuk menyederhanakan permasalahan pada

pengujian indentasi dengan metode elemen hingga dan terlihat dalam garis tebal. Sample material yang digunakan dalam analisis diasumsikan mempunyai karakter elastoplastik selama proses indentasi.



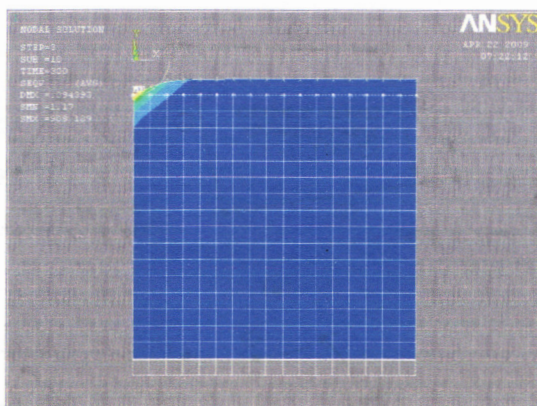
Gambar 2.12 Kondisi batas untuk model struktural [18]



Gambar 2.13 Ilustrasi Pemodelan untuk Pengujian Indentasi [7]

2.4.2 Pemodelan dengan Elemen Hingga

Pemodelan elemen hingga dan analisisnya dilakukan dengan bantuan metode elemen hingga yaitu *software ANSYS 9.0*. Spesimen uji dimodelkan melalui bidang elemen *axisymmetry* dengan tipe rigid (tetap) dengan garis elemen yang rigid. Dari kedua pemodelan, diberikan interaksi antara indenter dan spesimen melalui kontak elemen [1].

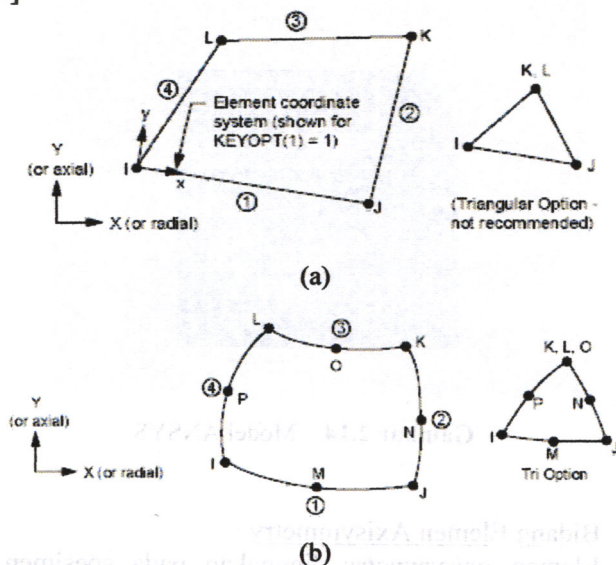


Gambar 2.14 Model ANSYS

1. Bidang Elemen Axisymmetry

Elemen *axisymmetry* digunakan pada spesimen karena lebih efisien (mengurangi DOF pada waktu komputasi) terhadap penyelesaian model menggunakan *axisymmetry*. Elemen *axisymmetry* adalah suatu elemen solid 2D yang mampu mengurangi model solid 3D menjadi model planar 2D. Dalam metode elemen hingga yang digunakan terdapat dua pilihan elemen untuk perlakuan model *axisymmetry* yaitu PLANE 42 dan PLANE 82. PLANE 42 digunakan untuk pemodelan 2D pada struktur solid. Elemen ini didefinisikan

kedalam 4 node yang mempunyai 2 DOF (derajat kebebasan) pada masing – masing nodenya meliputi translasi pada arah node x dan y . Elemen ini memiliki karakter spesifik yaitu *plasticity, swelling, large deflection* [19]. PLANE 82 adalah versi yang lebih tinggi versinya daripada 2D, elemen 4 node. Hasilnya lebih akurat, elemen 8 node didefinisikan oleh 8 node yang mempunyai 2 DOF (derajat kebebasan) pada masing – masing nodenya yaitu translasi pada arah x dan y [19].

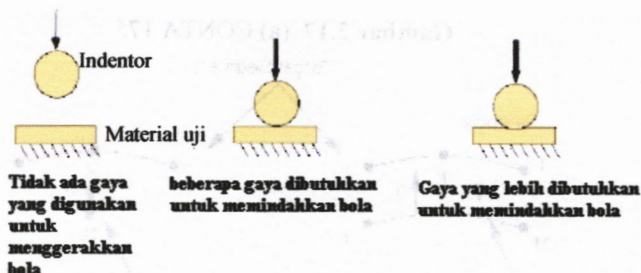


Gambar 2.15 (a) PLANE42 (b) PLANE82 [19]

2. Elemen Kontak

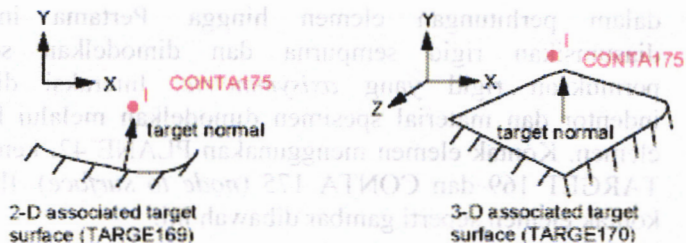
Simulasi indentasi elemen hingga dilakukan untuk permasalahan pada penekanan pada rigid spherical indenter yang dikontakkan dengan setengah bidang menggunakan ANSYS 9.0. Kriteria tegangan *Yield Von Mises* diberikan

dalam perhitungan elemen hingga. Pertama indenter diasumsikan rigid sempurna dan dimodelkan sebagai permukaan rigid yang *axisymmetric*. Interaksi diantara indenter dan material spesimen dimodelkan melalui kontak elemen. Kontak elemen menggunakan PLANE 42, kemudian TARGET 169 dan CONTA 175 (*node to surface*). Ilustrasi kontak elemen seperti gambar dibawah ini.

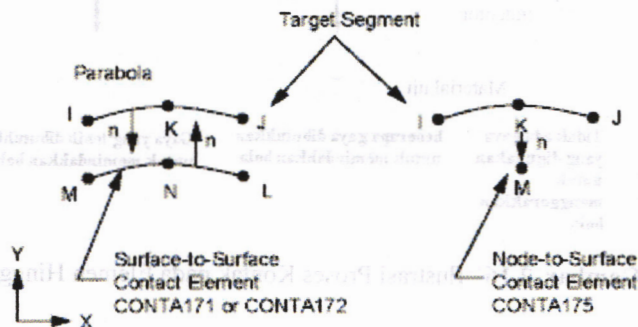


Gambar 2.16 Ilustrasi Proses Kontak pada Elemen Hingga [7]

CONTA 175 digunakan untuk memberikan kontak dan sliding diantara dua permukaan (atau diantara node dan permukaan, atau diantara suatu garis dan suatu permukaan) pada 2D atau 3D. Elemen ini sesuai dengan analisa struktur kontak elemen 2D atau 3D. Untuk tujuan yang diharapkan elemen CONTA175 digunakan bersama TARGE 169. TARGE169 diberikan untuk variasi permukaan target 2D untuk kontak elemen yang diasosiasikan [19].



Gambar 2.17 (a) CONTA 175

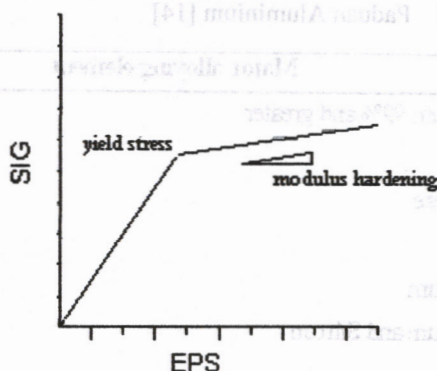


Gambar 2.17 (b) TARGE169 [19]

3. Pemodelan Material

Pada material, faktor yang menyebabkan kekakuan struktur (*structure stiffness*) mengalami perubahan selama menganalisa. Hubungan tegangan – regangan nonlinier pada material *plastic*, *multilinier elastic*, dan *hyperelastic* akan menyebabkan kekakuan struktur mengalami perubahan terhadap perbedaan beban (terutama pada perbedaan temperatur). Beberapa macam sifat pada material dapat dimasukkan kedalam analisa ANSYS jika menggunakan tipe elemen yang sesuai. Beberapa pilihan yang sesuai untuk mendiskripsikan sifat plastis. Model *bilinier isotropic*

hardening yang menggunakan dua slope (elastis dan plastis) memberikan karakteristik tegangan – regangan pada material.



Gambar 2.18 Model material dengan bilinear isotropic hardening [19]

2.5 Aluminium dan Paduannya

Aluminium adalah logam yang ringan, tahan korosi, penghantar listrik dan panas yang baik. Meskipun kekuatannya sangat rendah tetapi rasio berat terhadap kekuatannya masih lebih tinggi dari baja, sehingga banyak digunakan pada alat – alat transportasi, pesawat terbang dan lain – lain. Dalam kondisi murni Aluminium terlalu lunak dan kekuatannya sangat rendah. Oleh karena itu pada umumnya dilakukan pemuatan dengan logam lain untuk mendapatkan sifat mekanik yang diinginkan. Aluminium 7075-O merupakan aluminium yang dipadukan dengan seng. Sifat mekanik dari aluminium tidak hanya dipengaruhi oleh komposisi kimianya, tetapi juga oleh tingkat deformasi.

Untuk menggambarkan sifat mekanik ini, dibelakang angka kode paduan diberikan huruf yang menanda kondisinya antara lain ; F untuk *as fabricated*, O untuk *annealed*,

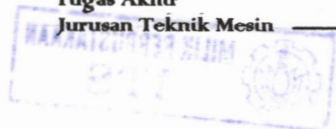
recrystallized, H untuk *strain hardened*, W untuk *solution heat treatment* atau T untuk *Thermally treated* [5].

Tabel 2.3 Paduan Aluminium [14]

Major alloying element	
Aluminium 99% and greater	1xxx
Copper	2xxx
Manganese	3xxx
Silicon	4xxx
Magnesium	5xxx
Magnesium and Silicon	6xxx
Zinc	7xxx
Other Element	8xxx

Aluminium adalah logam yang ringan, tahan korosi, penghantar listrik dan panas yang baik. Meskipun kekuatannya sangat rendah tetapi secara teknologi kekuatannya masih lebih tinggi dari baja, sehingga banyak digunakan pada alat-alat transportasi pesawat terbang dan lain-lain. Dalam kondisi normal Aluminium adalah logam dan kekuatannya sangat rendah. Oleh karena itu pada umumnya dilakukan penguatan dengan logam lain untuk mendapatkan sifat mekanik yang diinginkan. Aluminium 7075-T6 merupakan aluminium yang dipadukan dengan seng. Sifat mekanik dari aluminium tidak banyak dipengaruhi oleh komposisi kimianya, tetapi juga oleh tingkat deformasi.

Untuk mendapatkan sifat mekanik ini dilakukan anoda katepa pada permukaan bagian yang berada kondisinya anoda lain. F. mark as faktorasi 0 untuk anoda.



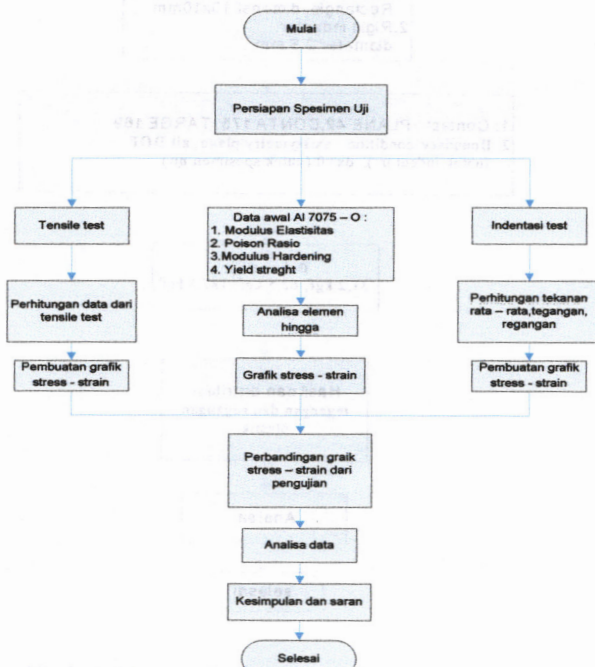
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Pelaksanaan ini dilakukan berdasarkan tahapan dalam penelitian antara lain : pembuatan spesimen uji, pengujian tarik, pengujian indentasi dan pengujian dengan menggunakan metode elemen hingga.

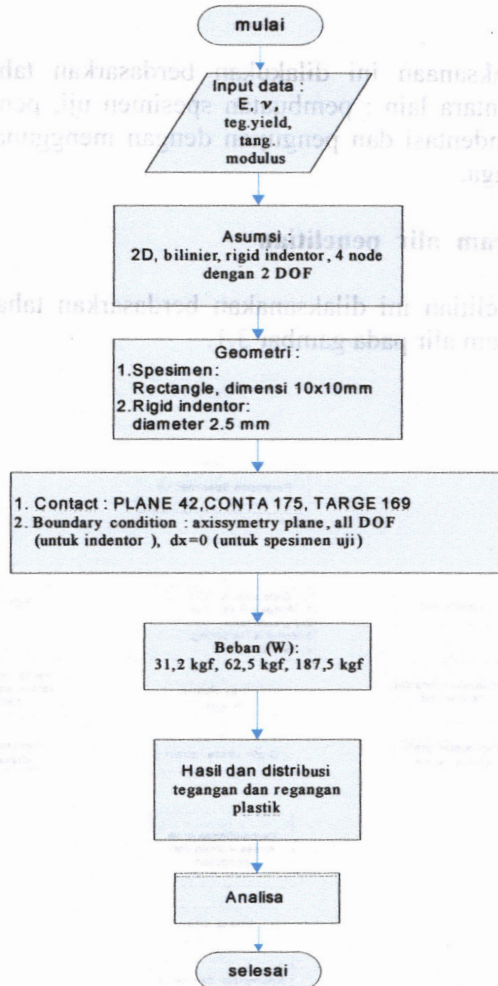
3.1 Diagram alir penelitian

Penelitian ini dilaksanakan berdasarkan tahapan-tahapan dalam diagram alir pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir untuk simulasi indentasi dengan metode elemen hingga dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Alir Pengujian dengan Metode Elemen Hingga

3.2 Persiapan spesimen uji

Dalam penelitian ini, spesimen uji yang digunakan adalah Aluminium 7075-O karena pemakaiannya sangat banyak dalam industri pesawat terbang. Adapun spesifikasi datanya adalah sebagai berikut:

Tabel 3.1 Komposisi kimia Aluminium 7075 [20]

Komposisi Kimia	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Ti	Cr
%	5.1-6.1	2.1-2.9	1.2-2	0.5	0.4	0.3	0.2	0.18-0.28

Tabel 3.2 menunjukkan sifat mekanik dari spesimen uji berdasarkan standarisasi dari Alcoa. Data tersebut juga digunakan sebagai input untuk pengujian indentasi dengan analisa elemen hingga sehingga kualitas hasilnya mampu dibandingkan dengan data indentasi dengan indenter Brinell.

Tabel 3.2 Sifat Mekanik Aluminium 7075-O [20]

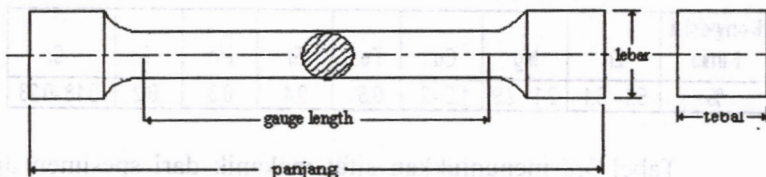
Sifat Mekanik	Ultimate Tensile Strenght	228 MPa
	Tensile Yield Strenght	103 Mpa
	Elongation	16%
	Modulus Elasticity	71.7 Gpa
	Hardness	60

Sifat mekanik dari paduan Aluminium 7075-O berdasarkan standar dari Alcoa meliputi antara lain : paduan Aluminium ini mempunyai kekuatan yang sangat tinggi dan kebanyakan digunakan pada bagian struktur yang mendapat tegangan yang sangat tinggi. Pemakaian paduan Aluminium 7075-O sering digunakan antara lain pada : *fitting* pesawat, *worm gears*, *missile parts*, *regulating valve parts*.

3.3 Pembuatan spesimen uji

3.3.1 Spesimen uji tarik

Spesimen untuk uji tarik dibuat dengan cara antara lain : berdasarkan standar JIS Z 2201 dan JIS Z 2241, adapun dimensi untuk pengujian tarik paduan Aluminium adalah berukuran (15x20x108) mm, dan berdiameter 12,5 mm. Pembuatan dan pengujian spesimen uji tarik dilakukan di bengkel.



Panjang : 108 mm

Lebar : 25 mm

Tebal : 15 mm

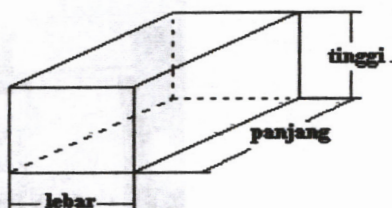
Gauge length : 50 mm

Gambar 3.3 Spesimen Uji Tarik

3.3.2 Spesimen uji indentasi

Spesimen uji dibuat dengan cara antara lain : pemotongan spesimen dengan gergaji dan dihasilkan spesimen dengan ukuran (35x18x12) mm, kemudian spesimen dihaluskan permukaannya menggunakan kertas gosok (amplas) dengan grade 100, 800, dan 1500. Selanjutnya spesimen diuji menggunakan metode pengujian Brinell dengan indenter bola memakai mesin digital indentasi EMCO.

Panjang : 35 mm
 Lebar : 18 mm
 Tebal : 12 mm



Gambar 3.4 Spesimen Uji Indentasi

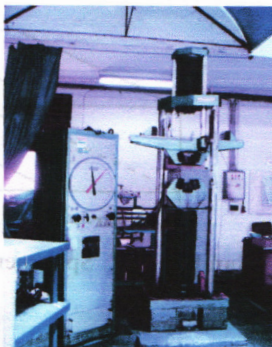


Gambar 3.5 Spesimen Uji Indentasi

3.4 Macam – macam pengujian

3.4.1 Uji tarik

Uji tarik dilakukan terhadap spesimen yang sesuai standar yang digunakan. Bahan yang akan dilakukan pengujian tarik dibuat menjadi bentuk yang sesuai dengan standar dari JIS. Spesimen dipasang pada mesin uji tarik, kemudian dijepit dan ditarik ke arah memanjang secara perlahan. Selama penarikan dicatat dengan pensil setiap penarikan pada mesin uji tarik, besarnya gaya tarik yang bekerja dan besarnya pertambahan panjang yang terjadi sebagai akibat dari gaya tarik tersebut tercatat dalam mesin uji tarik dalam bentuk grafik beban terhadap pertambahan panjang.



Gambar 3.6 Alat Uji Tarik

3.4.2 Uji indentasi

Uji indentasi dengan menggunakan metode Brinell test menggunakan indenter berupa bola karbida yang dikeraskan (spherical indenter). Beban penuh diberikan selama 30 detik, diameter indentasi spesimen diukur dengan mikroskop. Brinell hardness number adalah gaya yang diberikan dibagi dengan luas permukaan indentasi.



(a)



(b)

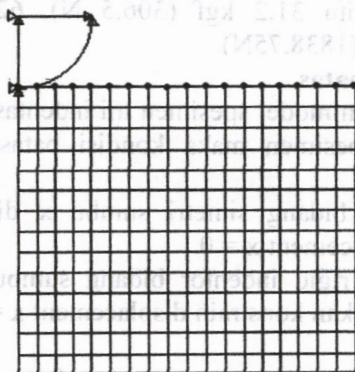
Gambar 3.7 (a) Alat Uji Indentasi; (b) proses pengujian indentasi Brinell

3.5 Pengujian indentasi dengan basis metode elemen hingga

3.5.1 Pemodelan

Untuk memodelkan elemen diujung material yang kontak dengan rigid indenter menggunakan 4 node *quadrilateral* 2D. Pemilihan ini didasarkan pada kemampuan 4 node yang sesuai dengan perpindahan bidang (*extra displacement shape*).

Pemodelan untuk pengujian indentasi dengan metode elemen hingga dilakukan dengan seperempat bagian dari material dikarenakan adanya kesimetrisan model, baik geometri maupun pembebanan. Model dibuat dengan cara membuat node node pada setiap elemen pada struktur spesimen tersebut. Kemudian berdasarkan node – node yang dibuat dilakukan pembuatan elemen (*meshing*) sehingga setelah semua elemen dibuat, didapatkan suatu struktur spesimen pengujian indentasi. Untuk *meshing* elemen pada spesimen untuk pengujian indentasi terdiri dari 289 elemen dan 324 node sepanjang titik kontak sampai tepi dari spesimen uji.



Gambar 3.8 Model dari ANSYS untuk pengujian indentasi dengan $\frac{1}{4}$ model

3.5.2 Input data

Adapun data yang dibutuhkan dalam analisa menggunakan metode elemen hingga antara lain :

1. **Material propertis**, dari spesimen plat aluminium paduan 7075-O, dengan :

- Modulus elastisitas (E) = 71700 Mpa
- Poisson rasio (ν) = 0.33
- Yield Stress (σ_y) = 103 Mpa
- Tangent Modulus = 57000 MPa

2. **Pembebanan**

Pembebanan yang dipakai dalam pengujian indentasi dengan metode elemen hingga adalah beban penekanan (indentasi) dengan nilai yang berbeda-beda untuk tiap diameter indenter yang berbeda disesuaikan dengan eksperimen. Untuk diameter indenter 2.5 mm dengan beban yaitu 31.2 kgf (306.5 N), 62.5 kgf (612.9N), 187.5kgf (1838.75N).

3. **Kondisi batas**

Pembuatan model spesimen uji indentasi menggunakan $\frac{1}{4}$ bagian spesimen maka kondisi batas yang diperlukan adalah :

- Pada bidang simetri sumbu x diberikan konstrain displacement $x = 0$
- Pada rigid indenter bidang sumbu x dan sumbu y diberikan konstrain displacement $x = 0$ dan $y = 0$

3.5.3 Perbandingan analisa elemen hingga dengan penelitian pengujian indentasi Brinell

Perbandingan antara hasil analisa metode elemen hingga, pengujian indentasi Brinell dan pengujian tarik dibandingkan dengan menampilkan grafik tegangan dan regangan pada masing-masing pengujian. Hasil pengujian dengan metode indentasi Brinell dan analisa elemen hingga akan ditampilkan dalam bentuk grafik tegangan – regangan. Data tegangan-regangan dari pengujian tarik juga akan diikut sertakan sebagai data acuan untuk melihat sifat mekanik tegangan luluh dan tegangan maksimum dari paduan Aluminium berdasarkan hubungan diantara ketiga metode tersebut. Tegangan luluh dan tegangan maksimum dari metode pengujian indentasi dengan indentor Brinell dan metode pengujian dengan elemen hingga akan dihitung dengan persamaan dalam bab sebelumnya dan hasil pengujian tersebut akan diperbandingkan dengan hasil yang diperoleh dari uji tarik, kemudian dianalisa lebih detail lagi.

3.2.3 Perbandingan analisa elemen dengan penelitian pengujian indentasi Brinell

Perbandingan antara hasil analisa metode elemen dengan penelitian indentasi Brinell dan pengujian tarik dibandingkan dengan menunjukkan grafik tegangan dan tegangan pada masing-masing pengujian. Hasil pengujian dengan metode indentasi Brinell dan analisa elemen harga akan dibandingkan dalam bentuk grafik tegangan - tegangan. Data tegangan-tegangan dari pengujian tarik juga akan dikaitkan sebagai data acuan untuk melihat sifat mekanik tegangan luluh dan tegangan maksimum dari paduan Aluminium berdasarkan hubungan diantara ketiga metode tersebut. Tegangan luluh dan tegangan maksimum dari metode pengujian "Brinell" dan metode pengujian dengan elemen harga akan dibanding dengan persamaan dalam bab sebelumnya dan hasil pengujian tersebut akan diperbandingkan dengan hasil yang diperoleh dari uji tarik kemudian dianalisa lebih detail lagi.

BAB 4

HASIL DAN ANALISA

Hasil penelitian yang diperoleh dari tiga metode pengujian yang berbeda yaitu pengujian tarik, pengujian indentasi dengan indenter Brinell dan pengujian dengan metode elemen hingga yang menggunakan *software* ANSYS 9.0 dengan pembebanan tekan akan dibahas pada bagian ini. Data ketiga pengujian ini selanjutnya diperbandingkan dan dianalisa untuk melihat kecenderungan antara hasil pengujian yang diperoleh.

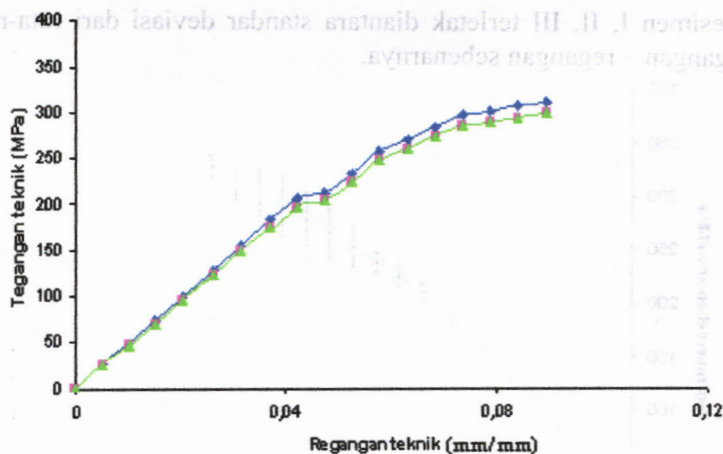
4.1 Data pengujian tarik

Hasil pengujian tarik untuk ketiga spesimen uji paduan Aluminium 7075-O ditunjukkan dalam tabel 4.1. Ketiga spesimen tersebut dipotong dan dibentuk sesuai standar pengujian tarik JIS Z 2201 dan mendapatkan perlakuan material yang sama.

Tabel 4.1: Data Pengujian Tarik

DATA ALUMINIUM 7075-O	I	II	III
Sebelum percobaan			
Standar specimen	JIS Z 2201	JIS Z 2201	JIS Z 2201
Standar pengujian	JIS Z 2241	JIS Z 2241	JIS Z 2241
Panjang spesimen awal (mm)	108,6	108,6	108,6
Gauge length, L_0 (mm)	50	50	50
Luas spesimen awal, A_0 (mm ²)	122,66	122,66	122,66
Saat percobaan			
Beban maksimum, P_u (KN)	37	37	38
A_l saat patah (mm)	11,41	11,41	11,41
Sesudah percobaan			
Panjang spesimen akhir (mm)	120	120	120
Gauge length, L_1 (mm)	61,41	61,41	61,41
Luas Spesimen akhir, A_1 (mm ²)	108,38	108,38	108,38
Yield strength N/mm	205,13	205,13	213,4
Ultimate tensile strength, σ (N/mm ²)	338,3	338,3	350,6
Elongation, ϵ (%) atau (mm/mm)	0,23	0,23	0,23

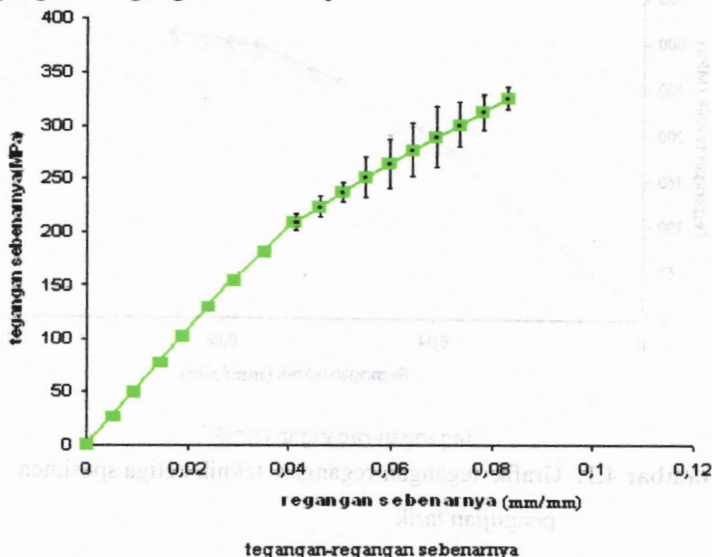
Data hasil pengujian kemudian diolah dan diperoleh grafik tegangan - regangan teknik. Gambar 4.1 merupakan grafik tegangan-regangan teknik paduan Aluminium 7075-O. Grafik tersebut mewakili karakter material ketika dalam kondisi beban tarik sehingga untuk material ulet akan terjadi ketidakstabilan yang menyebabkan timbulnya necking. Hal ini tidak akan terjadi ketika material tersebut diberi kondisi beban tekan karena material akan menunjukkan perubahan dimensi sebenarnya sesuai dengan beban yang diaplikasikan.



Gambar 4.1: Grafik tegangan-regangan teknik ketiga spesimen pengujian tarik

Grafik ini kemudian dirubah menjadi grafik tegangan-regangan sebenarnya untuk dapat diperbandingkan dengan hasil dari pengujian indentasi dan metode elemen hingga. Gambar 4.2 menunjukkan grafik tegangan-regangan sebenarnya dari ketiga spesimen, garis hijau menunjukkan nilai rata-rata yang diperoleh dari ketiga pengujian. Tegangan luluh (σ_y) untuk material ini ditentukan dengan metode *offset* (0,2% dari regangan) sementara tegangan maksimum sebenarnya diperoleh langsung dari grafik tegangan-regangan sebenarnya. Nilai tegangan luluh dan tegangan maksimum rata – rata beserta standar deviasi menunjukkan bahwa hasil dari ketiga pengujian tersebut masih relatif sama karena nilai tegangan luluh dan tegangan maksimum sebenarnya untuk

spesimen I, II, III terletak diantara standar deviasi dari rata-rata tegangan – regangan sebenarnya.



Gambar 4.2 : Grafik tegangan-regangan rata-rata sebenarnya untuk pengujian tarik

Hasil rata-rata dan standar deviasi tersebut selanjutnya akan digunakan sebagai data pembandingan untuk pengujian-pengujian dengan metode lain. Tabel 4.2 menunjukkan sifat mekanik hasil pengujian tarik, berdasarkan tabel tersebut diperoleh tegangan luluh dan tegangan maksimum rata-rata yaitu 207,90 MPa dan 324,4 MPa.

Tabel 4.2 : Hasil Pengujian Tarik

Sifat mekanik	spesimen I		spesimen II		spesimen III		rata - rata	
	σ _{true} (MPa)	ε _{true}	σ _{true} (MPa)	ε _{true}	σ _{true} (MPa)	ε _{true}	σ _{true} (MPa)	ε _{true}
teg. luluh (σ _y)	205,13	0,041	205,13	0,041	213,42	0,041	207,90 ± 4,78	0,041
teg. maksimum (σ _u)	324,30	0,086	324,30	0,086	337,60	0,086	324,40 ± 7,10	0,100
n	0,63		0,63		0,63		0,63	
K	1516,9		1516,9		1578,2		1537,34	

4.2 Hasil pengujian indentasi

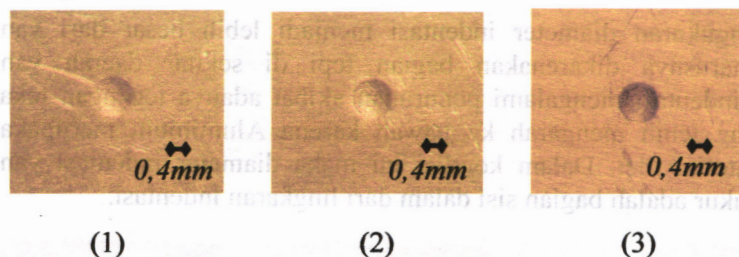
4.2.1 Data pengujian indentasi dengan indenter Brinell

Hasil pengujian indentasi menggunakan indenter Brinell dengan tiga variasi beban yang berbeda memberikan hasil berupa diameter indentasi yang makin bertambah seiring dengan pertambahan beban indentasi. Dalam pengujian ini beban yang diberikan bervariasi yaitu 306,5 N (31,2kgf), 612,9 N (62,5kgf), dan 1837,5 N (187,5kgf). Tabel 4.3 menunjukkan diameter indentasi yang terbentuk akibat pemberian beban indentasi yang berbeda.

Tabel 4.3 : Hasil pengujian indentasi dengan indenter Brinell
Untuk diameter indenter = 2.5 mm

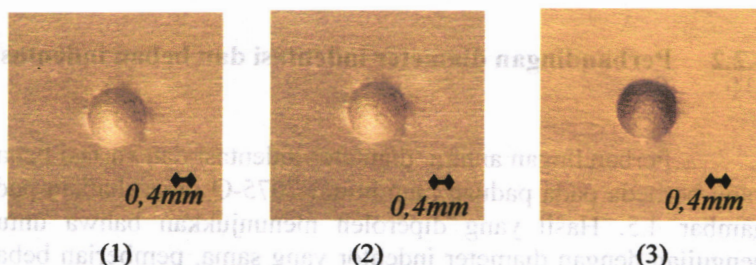
Beban indentasi	Diameter indentasi (mm)				kekerasan BHN
	d1	d2	$\frac{(d_1 + d_2)}{2}$	$d_r = \frac{3(d_1 + d_2)}{2}$	
306,5 N (31,2 kgf)	0,85	0,85	0,85		58
306,5 N (31,2 kgf)	0,8	0,8	0,8	$0,83 \pm 0,029$	
306,5 N (31,2 kgf)	0,85	0,85	0,85		
612,9 N (62,5 kgf)	1,15	1,15	1,15		60
612,9 N (62,5 kgf)	1,15	1,15	1,15	$1,16 \pm 0,014$	
612,9 N (62,5 kgf)	1,15	1,2	1,175		
1837,5 N (187,5 kgf)	1,8	1,8	1,8		61
1837,5 N (187,5 kgf)	1,8	1,8	1,8	$1,8 \pm 0,000$	
1837,5 N (187,5 kgf)	1,8	1,8	1,8		

Gambar 4.2 sampai gambar 4.4 menunjukkan tapak tekan indentasi yang dihasilkan oleh beban indentasi yang berbeda-beda. Beban indentasi 306,5 N menghasilkan diameter indentasi seperti dalam gambar 4.2. Seperti terlihat bahwa untuk pembebanan tersebut dihasilkan diameter yang relatif tidak bulat sempurna. Hal ini terjadi karena alat uji indentasi terpengaruh oleh faktor luar yang tidak dapat dikontrol secara sempurna, dalam hal ini, tingkat kerataan tempat (anvil) spesimen dari mesin uji serta getaran yang dihasilkan oleh mesin-mesin lain yang terdapat di sekitar mesin uji indentasi pada saat pengujian indentasi dilakukan.



Gambar 4.2 : Diameter indentasi pada pengujian indentasi dengan indenter Brinell dengan beban 306,5 N (31,2 kgf)

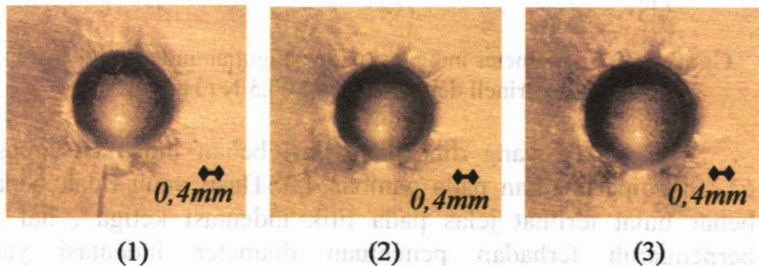
Indentasi yang dihasilkan dari beban indentasi sebesar 612,9N diperlihatkan pada gambar 4.3. Hasil yang tidak benar-benar bulat terlihat jelas pada titik indentasi ketiga, hal ini berpengaruh terhadap penentuan diameter indentasi yang selanjutnya akan memperbesar diameter rata-ratanya sehingga tegangan yang dihasilkan makin besar.



Gambar 4.3 : Diameter indentasi pada pengujian indentasi dengan indenter Brinell dengan beban 612,9 N (62,5 kgf)

Gambar 4.4 menunjukkan hasil diameter indentasi dengan pemberian beban sebesar 1837,5 N. Akibat pemberian beban yang tidak memenuhi persyaratan dari diameter indentasi yaitu $0,2D < d < 0,7D$, terjadi fenomena *sinking-in* yang menyebabkan

pengukuran diameter indentasi menjadi lebih besar dari yang seharusnya dikarenakan bagian tepi di sekitar daerah yang terindentasi mengalami penurunan akibat adanya tegangan tekan yang lebih mengarah ke bawah karena Aluminium merupakan material ulet. Dalam kondisi ini maka diameter indentasi yang diukur adalah bagian sisi dalam dari lingkaran indentasi.

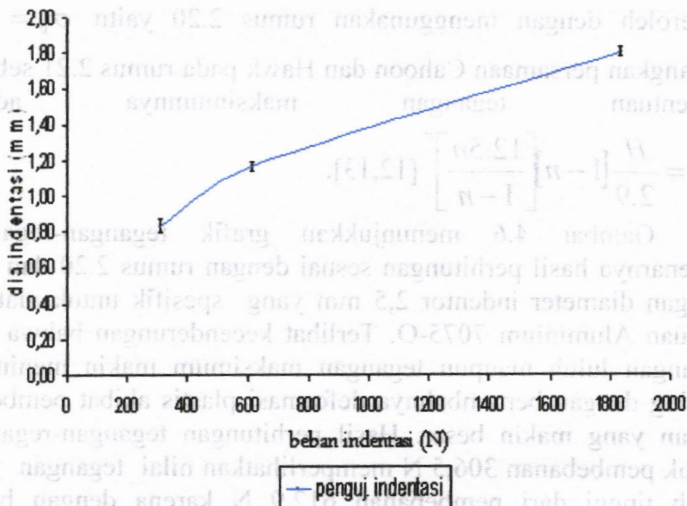


Gambar 4.4 : Diameter indentasi pada pengujian indentasi dengan indenter Brinell dengan beban 1837,5 N (187,5 kgf)

4.2.2 Perbandingan diameter indentasi dan beban indentasi

Perbandingan antara diameter indentasi dan variasi beban yang berbeda pada paduan aluminium 7075-O diperlihatkan pada gambar 4.5. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa untuk pengujian dengan diameter indenter yang sama, pemberian beban yang makin besar akan menghasilkan diameter indentasi yang lebih besar. Penambahan beban pada saat indentasi akan menyebabkan deformasi plastis yang terjadi makin dalam dan makin besar di daerah di bawah indentasi sehingga karakter material lebih terlihat. Perbedaan penambahan diperlihatkan dengan garis biru yang merupakan nilai rata-rata diameter indentasi dengan beban yang berbeda. Hal ini akan lebih terlihat

kelas dengan simulasi metode elemen hingga yang akan dibahas pada bagian 4.3.



Gambar 4.5 : Diameter indentasi terhadap beban indentasi untuk diameter indenter 2,5 mm

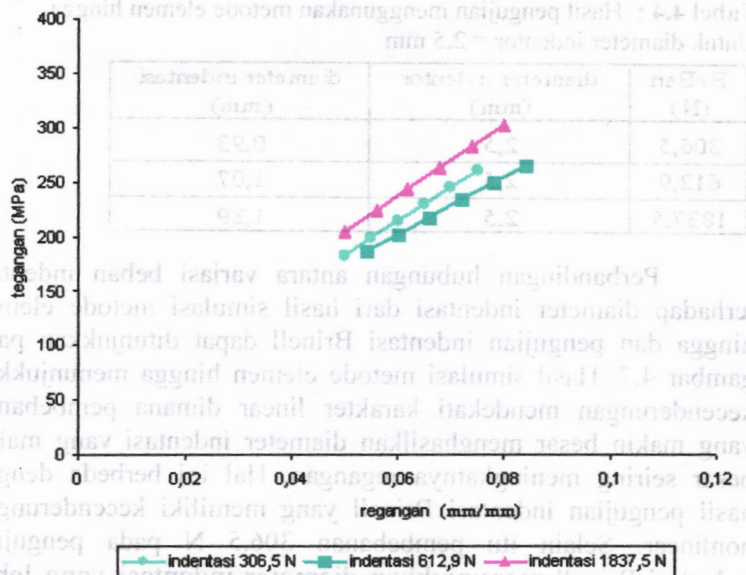
4.2.3 Grafik tegangan – regangan sebenarnya

Hasil pengujian indentasi yang berupa diameter indentasi dan beban dapat dirubah menjadi grafik tegangan-regangan sebenarnya yang dapat menggambarkan daerah deformasi plastis dari material yang diamati. Adapun rumus yang digunakan untuk perhitungan tegangan adalah rumus 2.13 sebagai berikut $\sigma = \left(\frac{1}{2,8}\right) P_m$ dimana $P_m = \frac{w}{\pi a^2}$ diperoleh dari rumus 2.11, sedangkan untuk penentuan regangan menggunakan rumus 2.15

sebagai berikut $\varepsilon = 0,2 \times (d/D)$. Kemudian tegangan luluh diperoleh dengan menggunakan rumus 2.20 yaitu $\sigma_y = H/3$ sedangkan persamaan Cahoon dan Hawk pada rumus 2.21 sebagai penentuan tegangan maksimumnya adalah

$$\sigma_u = \frac{H}{2.9} \left[1 - n \right] \left[\frac{12.5n}{1-n} \right]^n [12,13].$$

Gambar 4.6 menunjukkan grafik tegangan-regangan sebenarnya hasil perhitungan sesuai dengan rumus 2.20 dan 2.21 dengan diameter indenter 2,5 mm yang spesifik untuk material paduan Aluminium 7075-O. Terlihat kecenderungan bahwa baik tegangan luluh maupun tegangan maksimum makin meningkat seiring dengan bertambahnya deformasi plastis akibat pemberian beban yang makin besar. Hasil perhitungan tegangan-regangan untuk pembebanan 306,5 N memperlihatkan nilai tegangan yang lebih tinggi dari pembebanan 612,9 N karena dengan beban tersebut, luasan daerah yang terindentasi cukup kecil sehingga menyebabkan tegangan menjadi lebih besar, sedangkan tegangan-regangan akibat pembebanan 1837,5 N menunjukkan tegangan yang lebih tinggi karena pada kondisi ini terdapat *sinking-in* yang menyebabkan penambahan diameter indentasi tidak selaras dengan pemberian beban sehingga tegangan yang terjadi menjadi lebih besar pada regangan yang sama.



Gambar 4.6 Tegangan – regangan sebenarnya untuk pengujian indentasi

4.3 Hasil pengujian dengan metode elemen hingga

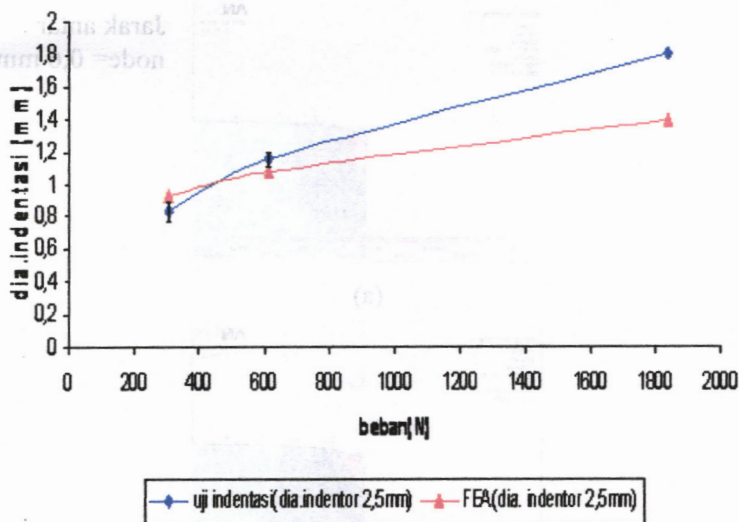
Keakuratan dari hasil pengujian indentasi Brinell yang diperoleh sekaligus kondisi deformasi plastis yang terjadi akibat pemberian pembebanan yang berbeda dapat diketahui dengan melakukan analisa dengan bantuan metode elemen hingga. Data input untuk metode elemen hingga diperoleh dari hasil pengujian tarik material paduan aluminium 7075-O. Hasil simulasi elemen hingga yang berupa diameter indentasi akibat pemberian beban 306,5 N, 612,9 N dan 1837,5 N dengan diameter indenter 2,5 mm dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 : Hasil pengujian menggunakan metode elemen hingga Untuk diameter indenter = 2,5 mm

BeBan (N)	diameter indenter (mm)	diameter indentasi (mm)
306,5	2,5	0,93
612,9	2,5	1,07
1837,5	2,5	1,39

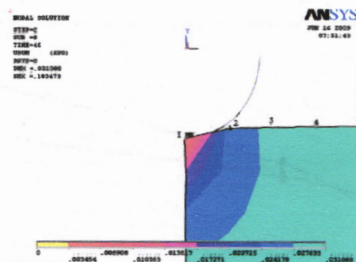
Perbandingan hubungan antara variasi beban indentasi terhadap diameter indentasi dari hasil simulasi metode elemen hingga dan pengujian indentasi Brinell dapat ditunjukkan pada gambar 4.7. Hasil simulasi metode elemen hingga menunjukkan kecenderungan mendekati karakter linear dimana pembebanan yang makin besar menghasilkan diameter indentasi yang makin besar seiring meningkatnya regangan. Hal ini berbeda dengan hasil pengujian indentasi Brinell yang memiliki kecenderungan nonlinier. Selain itu pembebanan 306,5 N pada pengujian indentasi Brinell menunjukkan diameter indentasi yang lebih kecil dibandingkan dengan hasil dari metode elemen hingga dengan perbedaan sekitar 12 % sedangkan 612,9 N dan 1837,5 N menghasilkan diameter indentasi lebih besar dari hasil elemen hingga dengan perbedaan sekitar 0 – 30 %.

Pengujian dengan elemen hingga lebih cenderung menghasilkan diameter indentasi yang relatif lebih kecil dibanding diameter indentasi hasil pengujian indentasi Brinell. Hal ini terjadi karena metode elemen hingga menerapkan kondisi ideal tanpa memperhitungkan pengaruh lingkungan sedangkan hasil pengujian indentasi Brinell sangat dipengaruhi oleh kondisi spesimen dan kondisi lingkungan.



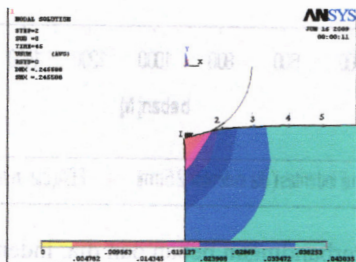
Gambar 4.7 : Perbandingan beban dan dia. indentasi untuk diameter indentor 2,5 mm

Hasil simulasi metode elemen hingga dengan ANSYS 9.0 yang menunjukkan distribusi perpindahan (*displacement*) *node*, distribusi tegangan dan distribusi regangan yang terjadi ditunjukkan pada gambar 4.8 sampai gambar 4.10. Distribusi perpindahan *node* pada gambar 4.8 digunakan untuk mencari kedalaman penetrasi indentor yang kemudian menentukan diameter indentasi yang diperoleh, sementara distribusi tegangan *Von Mises* dan *equivalent plastic strain* seperti yang terlihat pada gambar 4.9 dan gambar 4.10 digunakan untuk menentukan tegangan luluh dan tegangan maksimum pada material ini.

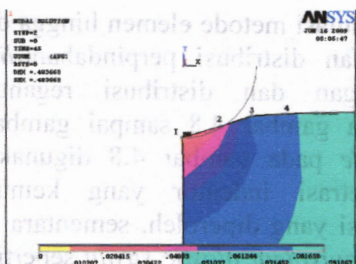


Jarak antar
node= 0,6 mm

(a)

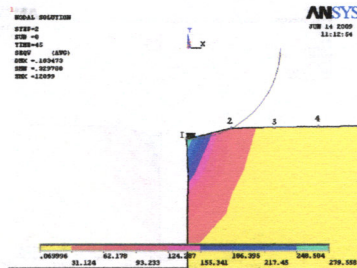


(b)

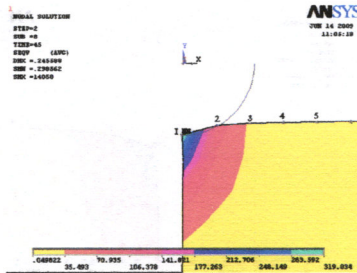


(c)

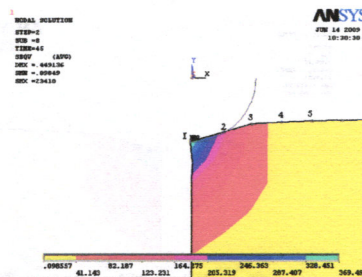
Gambar 4.8 : Perpindahan node untuk beban indentasi, (a) 306,5 N (31,2 kgf) (b) 612,9 N (62,5 kgf) (c) 1837,5 N (187,5 kgf)



(a)

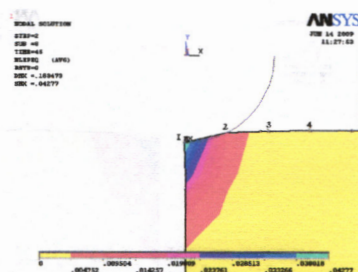


(b)

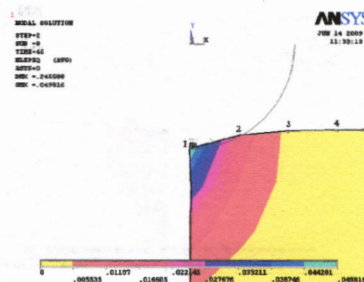


(c)

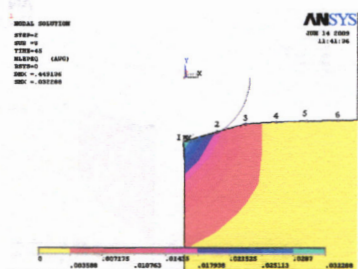
Gambar 4.9 : Distribusi tegangan Von Mises untuk beban indentasi, (a) 306,5 N (31,2 kgf) (b) 612,9 N (62,5 kgf) (c) 1837,5 N (187,5 kgf)



(a)



(b)

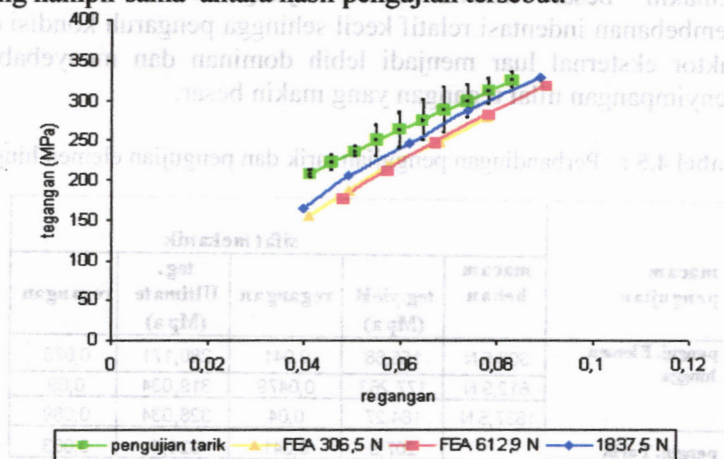


(c)

Gambar 4.10 : Distribusi regangan plastic equivalent untuk beban indentasi, (a) 306,5 N (31,2 kgf) (b) 612,9 N (62,5 kgf) (c) 1837,5 N (187,5 kgf)

4.3.1 Hasil uji elemen hingga dengan hasil uji tarik

Perbandingan tegangan-regangan sebenarnya yang diperoleh dari hasil simulasi metode elemen hingga dengan tegangan-regangan sebenarnya hasil uji tarik ditunjukkan pada gambar 4.11. Terdapat perbedaan yang cukup signifikan diantara kedua hasil tersebut dimana hasil metode elemen hingga memberikan nilai estimasi tegangan luluh yang lebih kecil dibanding tegangan hasil pengujian tarik sedangkan nilai regangan yang dihasilkan relatif sama namun mempunyai karakter linier yang hampir sama antara hasil pengujian tersebut.



Gambar 4.11 : Perbandingan tegangan – regangan untuk pengujian tarik dan pengujian elemen hingga dengan diameter indenter 2,5 mm

Tabel 4.5 menunjukkan nilai tegangan luluh dan tegangan maksimum yang relatif sama antara hasil simulasi metode elemen hingga dan hasil pengujian tarik. Terdapat perbedaan tegangan luluh yang berkisar antara 14-25% dengan kecenderungan nilai perbedaan yang makin besar dengan naiknya beban indentasi

namun untuk beban yang paling besar mengalami penurunan tegangan sehingga tegangan luluh akan lebih mudah terjadi sedangkan untuk tegangan maksimum berkisar antara 1-14% yang makin besar dengan bertambahnya beban yang digunakan dan cenderung lebih dekat dengan pengujian tarik. Hal ini terjadi karena dengan bertambahnya beban yang diberikan maka deformasi plastis pada daerah indentasi akan lebih luas sehingga lebih mewakili karakter dari material yang diuji. Pada kondisi beban yang lebih rendah diperoleh perbedaan nilai tegangan yang semakin besar karena daerah yang terdeformasi akibat pembebanan indentasi relatif kecil sehingga pengaruh kondisi dari faktor eksternal luar menjadi lebih dominan dan menyebabkan penyimpangan nilai tegangan yang makin besar.

Tabel 4.5 : Perbandingan pengujian tarik dan pengujian elemen hingga

macam pengujian	sifat mekanik				
	macam beban	teg. yield (Mpa)	regangan	teg. Ultimate (Mpa)	regangan
penguj. Elemen hingga	306,5 N	155,68	0,041	280,171	0,078
	612,9 N	177,263	0,0479	319,034	0,09
	1837,5 N	164,27	0,04	328,034	0,089
penguj. Tarik		207,9	0,041	324,4	0,083

Untuk menghitung kesalahan pada tegangan luluh, rumus yang digunakan adalah sebagai berikut :

Prosentase kesalahan untuk beban 306,5 N

$$= \frac{|207,9 - 155,68|}{207,9} \times 100\% = 25\%$$

Prosentase kesalahan untuk beban 612,9 N

$$= \frac{|207,9 - 177,26|}{207,9} \times 100\% = 14,7\%$$

Prosentase kesalahan untuk beban 1837,5 N

$$= \left| \frac{207,9 - 164,27}{207,9} \right| \times 100\% = 20,9\%$$

Sedangkan untuk tegangan maksimum, kesalahan yang diperoleh yaitu :

Prosentase kesalahan untuk beban 306,5 N

$$= \left| \frac{324,4 - 280,17}{324,4} \right| \times 100\% = 13,6\%$$

Prosentase kesalahan untuk beban 612,9 N

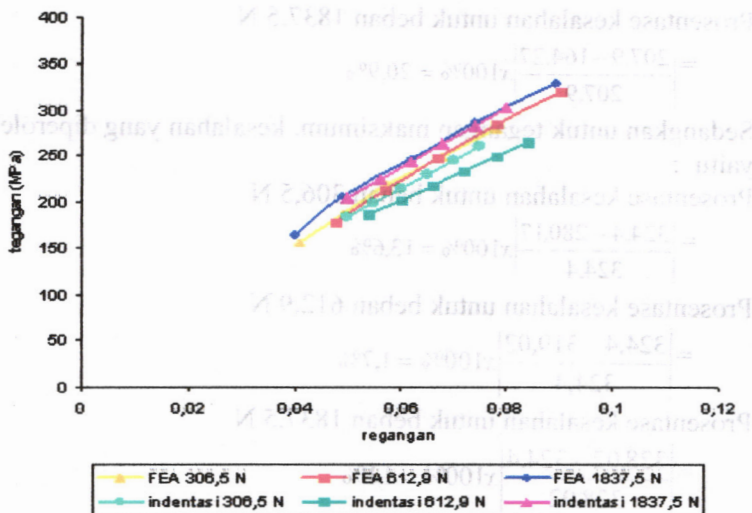
$$= \left| \frac{324,4 - 319,02}{324,4} \right| \times 100\% = 1,7\%$$

Prosentase kesalahan untuk beban 1837,5 N

$$= \left| \frac{328,02 - 324,4}{328,02} \right| \times 100\% = 1,1\%$$

4.3.2 Hasil uji elemen hingga dengan hasil uji indentasi Brinell

Untuk mengetahui tingkat kemampuan simulasi metode elemen hingga dalam memprediksi tegangan-regangan dari paduan aluminium 7075-O maka hasil perhitungan dari simulasi metode elemen hingga diverifikasi dengan hasil pengujian indentasi Brinell. Gambar 4.12 menunjukkan perbandingan tegangan-regangan sebenarnya yang diperoleh dari metode elemen hingga dan pengujian indentasi Brinell. Terdapat perbedaan yang signifikan dimana hasil pengujian dengan elemen hingga nilai tegangan luluh yang dihasilkan relatif lebih kecil dari pengujian dengan indentasi Brinell namun regangan yang terjadi relatif sama dan mempunyai karakter linier.



Gambar 4.12 : Perbandingan tegangan – regangan untuk pengujian indentasi Brinell dan pengujian elemen hingga

Tabel 4.6 menunjukkan nilai tegangan luluh dan tegangan maksimum yang tidak sama antara hasil simulasi metode elemen hingga dan hasil pengujian indentasi dengan indenter Brinell. Tegangan luluh mempunyai perbedaan yang berkisar antara 4-20%, kecenderungan perbedaan ini makin besar dengan naiknya beban indentasi namun untuk beban yang paling besar mengalami penurunan tegangan karena faktor dari lingkungan tidak diperhatikan di dalam pengujian elemen hingga sehingga tegangan-regangan yang dihasilkan lebih mendekati kondisi ideal sedangkan untuk tegangan maksimum berkisar antara 7-17% yang makin besar dengan bertambahnya beban namun cenderung turun dengan penambahan beban yang lebih besar. Hal ini terjadi karena dengan bertambahnya beban yang diberikan maka deformasi plastis pada daerah indentasi akan lebih luas sehingga lebih mewakili karakter dari material yang diuji namun pada pengujian

dengan elemen hingga, deformasi plastis tidak dapat menggambarkan kondisi sebenarnya karena bentuk deformasi sangat bergantung dengan pembagian elemen-elemen dalam material yang diuji, semakin dekat jarak antar node maka dapat diperoleh kondisi sebenarnya.

Tabel 4.6 : Hasil pengujian indentasi dengan elemen hingga dan pengujian Brinell

	macam beban	sifat mekanik			
		teg. yield (Mpa)	regangan	teg. Ultimate (Mpa)	regangan
penguj. Elemen hingga	306,5 N	155,68	0,041	280,171	0,078
	612,9 N	177,263	0,0479	319,034	0,09
	1837,5 N	164,27	0,04	328,451	0,089
penguj. indentasi brinell	306,5 N	182,52	0,052	259,75	0,075
	612,9 N	185,76	0,054	264,56	0,084
	1837,5 N	204,11	0,05	301,78	0,08

Untuk menghitung kesalahan pada tegangan luluh, rumus yang digunakan adalah sebagai berikut :

Prosentase kesalahan untuk beban 306,5 N

$$= \left| \frac{182,52 - 155,68}{182,52} \right| \times 100\% = 14,7\%$$

Prosentase kesalahan untuk beban 612,9 N

$$= \left| \frac{185,76 - 177,26}{185,76} \right| \times 100\% = 4,6\%$$

Prosentase kesalahan untuk beban 1837,5 N

$$= \left| \frac{204,11 - 164,27}{204,11} \right| \times 100\% = 19,5\%$$

Sedangkan untuk tegangan maksimum, kesalahan yang diperoleh yaitu :

Prosentase kesalahan untuk beban 306,5 N

$$= \left| \frac{280,17 - 259,75}{280,17} \right| \times 100\% = 7,3\%$$

Prosentase kesalahan untuk beban 612,9 N

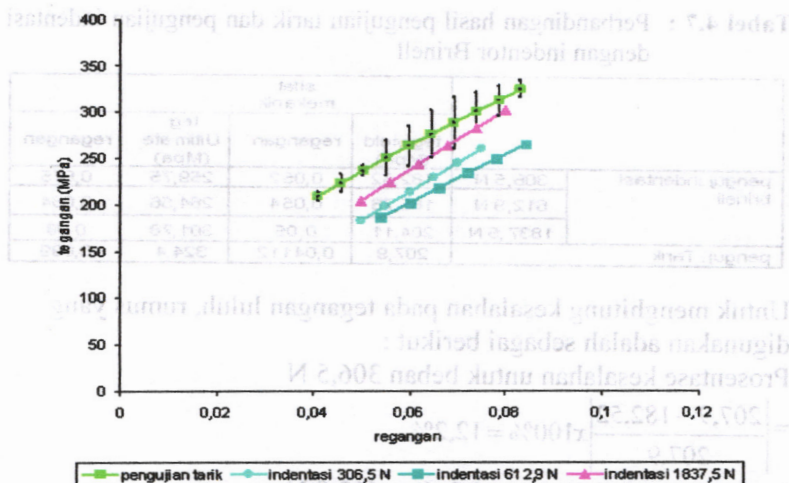
$$= \left| \frac{319,02 - 264,56}{319,02} \right| \times 100\% = 17\%$$

Prosentase kesalahan untuk beban 1837,5 N

$$= \left| \frac{328,02 - 301,78}{328,02} \right| \times 100\% = 7,9\%$$

4.4 Perbandingan pengujian tarik dengan pengujian indentasi Brinell

Untuk mengetahui kualitas pengujian indentasi indenter Brinell dapat diperoleh dengan melakukan koreksi dengan hasil pengujian tarik. Pada gambar 4.6 menunjukkan grafik perbandingan antara pengujian tarik dan pengujian indentasi, dari grafik hasil tersebut terdapat perbedaan pada tegangan luluh dan tegangan maksimumnya tetapi pada pembebanan 1837,5 N relatif mendekati pengujian tarik. Terlihat pada pengujian indentasi bahwa nilai tegangan luluh dan tegangan maksimum lebih kecil dari hasil pengujian tarik. Hal ini disebabkan karena luas yang mengalami tegangan mempunyai bentuk yang tidak sama, disamping itu untuk pengujian indentasi, makin besar pembebanan indentasinya maka karakter dari material akan lebih banyak diketahui.



Gambar 4.13 : Perbandingan tegangan – regangan untuk pengujian tarik dan pengujian indentasi Brinell

Tabel 4.7 menunjukkan nilai tegangan luluh dan tegangan maksimum yang relatif sama. Untuk perhitungan tegangan luluh terdapat perbedaan berkisar 1-12,5% kecenderungan ini karena makin meningkatnya pembebanan maka makin tinggi nilai tegangan dan makin mendekati hasil pengujian tarik sedangkan perbedaan tegangan maksimum berkisar 6-20% dengan regangan yang relatif sama. Hal ini karena dengan makin besarnya pembebanan maka kondisi maksimum akan lebih mudah tercapai untuk pengujian indentasi.

Tabel 4.7 : Perbandingan hasil pengujian tarik dan pengujian indentasi dengan indenter Brinell

		sifat mekanik			
		teg.yield (Mpa)	regangan	teg. Ultimate (Mpa)	regangan
penguj. indentasi brinell	306,5 N	182,52	0,052	259,75	0,075
	612,9 N	185,76	0,054	264,56	0,084
	1837,5 N	204,11	0,05	301,78	0,08
penguj. Tarik		207,9	0,04112	324,4	0,099

Untuk menghitung kesalahan pada tegangan luluh, rumus yang digunakan adalah sebagai berikut :

Prosentase kesalahan untuk beban 306,5 N

$$= \left| \frac{207,9 - 182,52}{207,9} \right| \times 100\% = 12,2\%$$

Prosentase kesalahan untuk beban 612,9 N

$$= \left| \frac{207,9 - 185,76}{207,9} \right| \times 100\% = 10,6\%$$

Prosentase kesalahan untuk beban 1837,5 N

$$= \left| \frac{207,9 - 204,11}{207,9} \right| \times 100\% = 1,8\%$$

Sedangkan untuk tegangan maksimum, kesalahan yang diperoleh yaitu :

Prosentase kesalahan untuk beban 306,5 N

$$= \left| \frac{324,4 - 259,75}{324,4} \right| \times 100\% = 19,9\%$$

Prosentase kesalahan untuk beban 612,9 N

$$= \left| \frac{324,4 - 264,56}{324,4} \right| \times 100\% = 18,4\%$$

Prosentase kesalahan untuk beban 1837,5 N

$$= \left| \frac{324,4 - 301,78}{324,4} \right| \times 100\% = 6,9\%$$

BAB 5**KESIMPULAN DAN SARAN**

Dari penelitian yang dilakukan pada paduan Aluminium 7075-O dengan kondisi spesimen adalah annealed, diperoleh hasil antara pengujian yang dilakukan (pengujian tarik, pengujian indentasi dengan indenter Brinell, pengujian dengan metode elemen hingga) dan didapatkan hubungan diantara pengujian tersebut.

5.1 Kesimpulan

Perbandingan hasil analisa metode elemen hingga dengan *software ANSYS 9.0* pada kasus indentasi menggunakan indenter bola, pengujian indentasi menggunakan indenter Brinell dan pengujian tarik dapat diambil kesimpulan yaitu :

1. Hasil pengujian indentasi dengan Elemen Hingga diperoleh tegangan luluh dan tegangan maksimum sebesar 155,68 MPa dan 280,17 MPa untuk beban 306,5 N sedangkan tegangan luluh dan tegangan maksimum yaitu 177,3 MPa dan 319 MPa untuk beban 612,9 N, tetapi untuk pengujian indentasi dengan indenter Brinell diperoleh tegangan luluh dan tegangan maksimum yaitu 182,5 MPa dan 259,8 MPa untuk beban 306,5 N sedangkan tegangan luluh dan tegangan maksimum yaitu 185,8 MPa dan 264,6 MPa untuk beban 612,9 N, dengan pemberian beban yang sama pada spesimen uji diperoleh prosentase kesalahan untuk tegangan luluh berkisar 4-20% dan tegangan maksimumnya antara 7-17% sehingga hasil pengujian indentasi Brinell akan relatif mendekati hasil pengujian tarik dengan makin kecil nilai prosentase kesalahannya.

2. Karakter sifat mekanik yang relatif mendekati dengan pengujian tarik yaitu pengujian indentasi dengan indenter Brinell yaitu dengan pemberian beban 1837,5 N, namun beban ini tidak memenuhi persyaratan $0,2D < d < 0,7D$ yang menyebabkan terjadinya *sinking in* sehingga penyimpangan diameter indentasinya terlalu besar, dengan menghasilkan tegangan luluh sebesar 204,11 MPa dan untuk pengujian tarik 207,9 MPa dengan prosentase kesalahan 1,8% sedangkan tegangan maksimum berkisar 301,78 MPa untuk pengujian indentasi Brinell dan 324,4 MPa untuk pengujian tarik dengan prosentase kesalahan 6,9%.
3. Pengujian indentasi untuk paduan Aluminium 7075-O dapat digunakan sebagai alternatif pengujian untuk memperoleh sifat mekanik material dengan cepat dan tidak merusak.

5.2 Saran

Penelitian ini masih membutuhkan pengembangan lebih lanjut, sehingga penulis memberikan saran – saran apabila ingin mengembangkan penelitian ini, antara lain :

- a. Menggunakan contact dalam simulasi pengujian dengan ANSYS 9.0 maka disarankan memakai PLANE 82 (*isoparametrik* dengan 8 node) karena didapatkan hasil yang detail dan lebih akurat. Dan untuk pemodelan dalam elemen hingga (dengan *software ANSYS 9.0*) sebaiknya menggunakan 3D karena dapat mengkondisikan pengujian yang sebenarnya.
- b. Dalam melakukan *meshing* sebaiknya menggunakan model *meshing* terkonsentrasi (terpusat) pada satu titik kontak karena akan didapatkan perpindahan (*displacement*) yang lebih akurat dan konturnya lebih cenderung halus (*smooth*) serta lebih mudah dalam mengamati perpindahan nodenya.

- c. Sebelum melakukan ketiga pengujian disarankan untuk melakukan pengujian komposisi kimia dari material (spesimen uji), supaya dalam menganalisa lebih jelas bahwa material (spesimen) uji masih dalam satu material.
- d. Untuk menghitung *error reduction algorithm* dilakukan dengan tambahan *software* MATLAB sehingga hasil dari elemen hingga dengan ANSYS akan lebih mendekati hasil yang diharapkan.
- e. Menggunakan *instrumented indentation testing*, dengan alat ini akan lebih diketahui kedalam indentasi terhadap beban sehingga mampu diperoleh karakteristik material lebih detail dan akurat lagi.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

- c. Sebelum melakukan ketiga pengujian diuraikan untuk melakukan pengujian komposisi kimia dari material (spesimen uji) supaya dalam menganalisa lebih jelas bahwa material (spesimen) uji masih dalam satu material.
- d. Untuk menghitung error reduction algorithm dilakukan dengan tambahan software MATLAB sehingga hasil dari elemen hingga dengan ANSYS akan lebih mendekati hasil yang diharapkan.
- e. Menggunakan instrumented indentation testing dengan alat ini akan lebih diketahui keadaan indentasi terhadap bahan sehingga mampu diperoleh karakteristik material lebih detail dan akurat lagi.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

Daftar Pustaka

- [1] Stolarski, T, 2006, **Engineering Analysis with Ansys Software**, Brunel University, Middlesex, United Kingdom
- [2] Tabor, D, 1951, **The Hardness of Metal**, Clarendon Press, Oxford
- [3] Hayden, W, 1965, **The structure and Properties of Materials**, Eastern University, New Delhi
- [4] Cedric, W. Richards, 1961, **Engineering Materials Science**, Stanford University, California
- [5] Dieter, E, George, 1961, **Mechanical Metallurgy**, Mc Graw Hill Inc, New York
- [6] Janakiraman, B, 2004, **jurnal Mechanical Property Measurement by Indentation**, Texas A&M University, Texas
- [7] Waluyo, Sugeng, 2006, **Finite Element Simulation of Nanoindentation Test Using Spherical Indenter**, Munchen University
- [8] Darmastiti, Rini^[1], Fisher J^[2], 2008, **Finite Element Modeling of 2D Elastic Plastic Contacts**, Universitas Gadjah Mada, Leeds University, Leeds, United Kingdom
- [9] Calce, 2001, **Material hardness**, university of Maryland, sesuaidenganwww.wikipedia.org/wiki/Brinell_hardness_test, diakses tanggal 28 Januari 2009
- [10] Navigation, suche, 2005, **brinell hardness test**, DIN EN ISO 6506-1, sesuai dengan [www.google.com/Hpm-wiki/NEWAGE testing instrument](http://www.google.com/Hpm-wiki/NEWAGE_testing_instrument), diakses tanggal 10 Juli 2008

- [11] Aerospace specification data, automation creation.inc, sesuaidenganwww.Matweb.com/ASMAerospaceSpecification Metals, diakses tanggal 29 Juli 2009
- [12] Cahoon, J.R, 1970, jurnal tentang The Determined Yield Strength from Hardness Measurements, University of Manitoba, Manitoba
- [13] Hawk, JA, 1988, Yield Strength as determined from hardness measurements for mechanically alloyed Aluminium base alloy, university of Virginia, USA
- [14] Suherman, Wahid, Pengetahuan Bahan, Jurusan Teknik Mesin, ITS Surabaya
- [15] Callister, William. D, 2007, Materials science and engineering, University of Utah, USA
- [16] Johson K.L, the correlation of indentation experiment, university engineering department of cambridge
- [17] Babuska, Ivo; Uday Banerjee, John E. Osborn, 2004, Generalized Finite Element Methods: Main Ideas, Results, and Perspective, International Journal of Computational Methods, [www.wikipedia.com/finite element method.html](http://www.wikipedia.com/finite%20element%20method.html)
- [18] Mulford, Roberta, 2004, Spherical indentation of ductile power law materials, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico
- [19] Reid, D.John, 1998, LS-DYNA examples manual, department of mechanical engineering, university of Nebraska, Lincoln, [sesuaidenganwww.google.com/ANSYS tutorial.html](http://www.google.com/ANSYS%20tutorial.html)
- [20] Navy, US Alcoa Mill Products, Alloy 7075 plate and sheet, [sesuaidenganwww.google.com/alcoa/datasheet_Aluminium7075-Opdf](http://www.google.com/alcoa/datasheet_Aluminium7075-Opdf), diakses tanggal 2 juli 2008

LAMPIRAN

1. LAMPIRAN HASIL PENGUJIAN TARIK

1.1 HASIL UJI TARIK

spesimen I						spesimen II						spesimen III						rata - rata		SD TE
P (N)	ΔL (mm)	σteknik (MPa)	σteknik	σtrue (MPa)	σtrue	P (N)	ΔL (mm)	σteknik (MPa)	σteknik	σtrue (MPa)	σtrue	P (N)	ΔL (mm)	σteknik (MPa)	σteknik	σtrue (MPa)	σtrue	σtrue (MPa)	σtrue	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3218	0.5705	26.248	0.005	26.386	0.005	3218	0.5705	26.248	0.005	26.386	0.005	3348	0.5705	27.308	0.005	27.452	0.005	26.741	0.005	
6436	1.141	52.496	0.011	53.047	0.010	6436	1.141	52.496	0.011	53.047	0.010	6696	1.141	54.617	0.011	55.190	0.010	53.762	0.010	
8045	1.7115	65.588	0.016	66.621	0.016	8045	1.7115	65.588	0.016	66.621	0.016	8370	1.7115	68.237	0.016	69.313	0.016	67.519	0.016	
11263	2.282	91.868	0.021	93.798	0.021	11263	2.282	91.868	0.021	93.798	0.021	11718	2.282	95.579	0.021	97.588	0.021	95.061	0.021	
14481	2.8525	118.116	0.026	121.218	0.026	14481	2.8525	118.116	0.026	121.218	0.026	15066	2.8525	122.887	0.026	126.115	0.026	122.851	0.026	
17699	3.423	144.364	0.032	148.914	0.031	17699	3.423	144.364	0.032	148.914	0.031	18414	3.423	150.196	0.032	154.930	0.031	150.919	0.031	
20917	3.9935	170.612	0.037	176.886	0.036	20917	3.9935	170.612	0.037	176.886	0.036	21762	3.9935	177.504	0.037	184.031	0.036	179.268	0.036	
24135	4.564	196.860	0.042	205.133	0.041	24135	4.564	196.860	0.042	205.133	0.041	25110	4.564	204.812	0.042	213.420	0.041	207.895	0.041	4.76
24939.5	5.1345	203.422	0.047	213.039	0.046	24939.5	5.1345	203.422	0.047	213.039	0.046	25947	5.1345	211.639	0.047	221.646	0.046	222.364	0.046	9.34
27353	5.705	223.108	0.053	234.828	0.051	27353	5.705	223.108	0.053	234.828	0.051	28458	5.705	232.121	0.053	244.315	0.051	236.293	0.051	5.86
30249.2	6.2755	246.731	0.058	260.988	0.056	30249.2	6.2755	246.731	0.058	260.988	0.056	31471.2	6.2755	256.698	0.058	271.532	0.056	249.749	0.056	19.07
31858.2	6.846	259.855	0.063	276.236	0.061	31858.2	6.846	259.855	0.063	276.236	0.061	33145.2	6.846	270.352	0.063	287.395	0.061	262.786	0.061	21.99
33467.2	7.4165	272.979	0.068	291.621	0.066	33467.2	7.4165	272.979	0.068	291.621	0.066	34819.2	7.4165	284.007	0.068	303.402	0.066	275.449	0.066	25.54
34915.3	7.987	284.790	0.074	305.735	0.071	34915.3	7.987	284.790	0.074	305.735	0.071	36325.8	7.987	296.295	0.074	318.086	0.071	287.775	0.071	27.96
35398	8.5575	288.728	0.079	311.479	0.076	35398	8.5575	288.728	0.079	311.479	0.076	36828	8.5575	300.392	0.079	324.062	0.076	299.794	0.076	20.76
36041.6	9.128	293.977	0.084	318.686	0.081	36041.6	9.128	293.977	0.084	318.686	0.081	37497.6	9.128	305.853	0.084	331.561	0.081	311.533	0.081	15.87
36524.3	9.6985	297.914	0.089	324.520	0.086	36524.3	9.6985	297.914	0.089	324.520	0.086	37999.8	9.6985	309.949	0.089	337.629	0.086	324.402	0.086	9.35

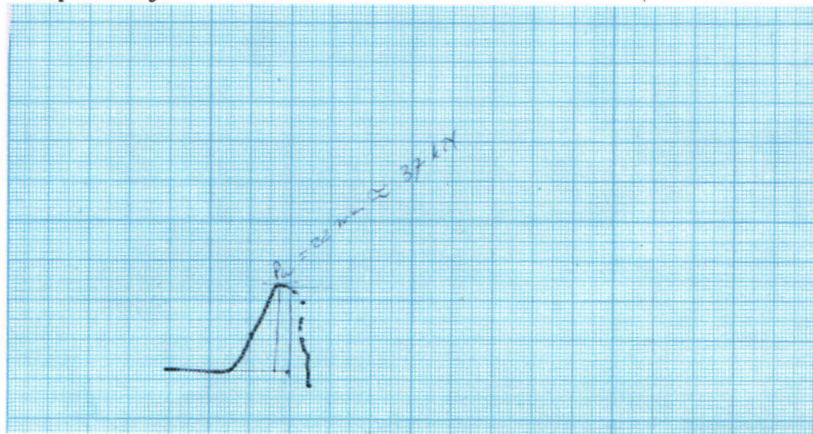
Keterangan : berdasarkan perhitungan didapatkan harga n dan K yaitu 0,62 dan 1537,34 MPa

1.2. Grafik P- ΔL untuk pengujian tarik

Keterangan :

- Warna kuning untuk tegangan luluh
- Warna merah untuk tegangan maksimum

1. Spesimen uji 1

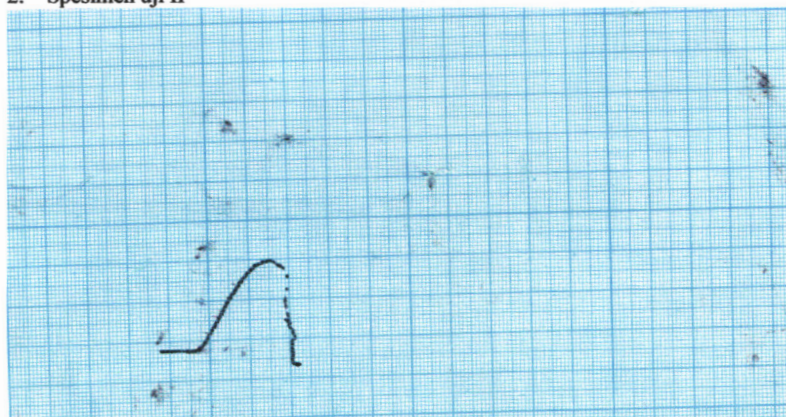


Data perhitungan tegangan-regangan teknik dan sebenarnya

spesimen I

x	y	P	ΔL	L0	A0	L1	A1	σ_{teknik}	ϵ_{teknik}	σ_{true}	ϵ_{true}
0	0	0	0.000	108.6	123	108.600	122.7	0	0.00	0.00	0.00
1	2	3218	0.571	108.6	123	109.171	122.0	26.25	0.01	26.39	0.01
2	3.6	5792.4	1.141	108.6	123	109.741	121.3	47.25	0.01	47.74	0.01
3	5	8045	1.712	108.6	123	110.312	120.8	65.59	0.02	66.62	0.02
4	7	11263	2.282	108.6	123	110.882	120.1	91.87	0.02	93.80	0.02
5	9	14481	2.853	108.6	123	111.453	119.5	118.12	0.03	121.22	0.03
6	11	17699	3.423	108.6	123	112.023	118.9	144.36	0.03	148.91	0.03
7	13	20917	3.994	108.6	123	112.594	118.3	170.61	0.04	176.89	0.04
8	15	24135	4.564	108.6	123	113.164	117.7	196.86	0.04	205.13	0.04
9	15.5	24939.5	5.135	108.6	123	113.735	117.1	203.42	0.05	213.04	0.05
10	17	27353	5.705	108.6	123	114.305	116.5	223.11	0.05	234.83	0.05
11	18.8	30249.2	6.276	108.6	123	114.876	115.9	246.73	0.06	260.99	0.06
12	19.8	31858.2	6.846	108.6	123	115.446	115.3	259.85	0.06	276.24	0.06
13	20.8	33467.2	7.417	108.6	123	116.017	114.8	272.98	0.07	291.62	0.07
14	21.7	34915.3	7.987	108.6	123	116.587	114.2	284.79	0.07	305.74	0.07
15	22	35398	8.558	108.6	123	117.158	113.6	288.73	0.08	311.48	0.08
16	22.4	36041.6	9.128	108.6	123	117.728	113.1	293.98	0.08	318.69	0.08
17	22.7	36524.3	9.699	108.6	123	118.299	112.5	297.91	0.09	324.52	0.086

2. Spesimen uji II



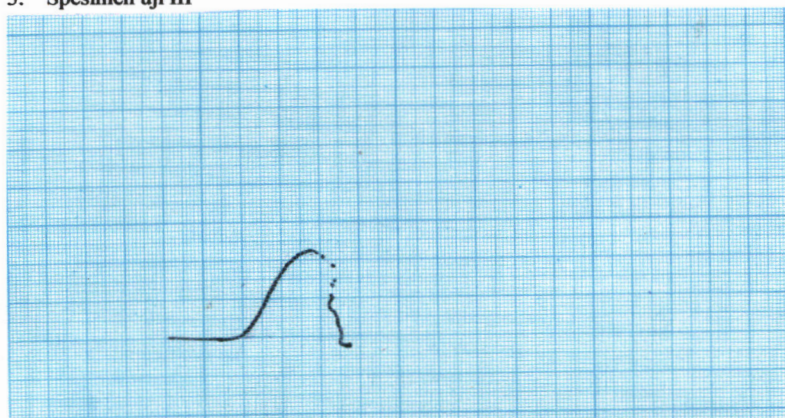
Data perhitungan tegangan-regangan teknik dan sebenarnya

spesimen II

t	y	P	ΔL	L0	A0	L1	A1	σ_{teknik}	ϵ_{teknik}	σ_{true}	ϵ_{true}
0	0	0	0.000	108.6	123	108.600	122.7	0	0.00	0.00	0.00
1	2	3218	0.571	108.6	123	109.171	122.0	26.25	0.01	26.39	0.01
2	3.6	5792.4	1.141	108.6	123	109.741	121.3	47.25	0.01	47.74	0.01
3	5	8045	1.712	108.6	123	110.312	120.8	65.59	0.02	66.62	0.02
4	7	11263	2.282	108.6	123	110.882	120.1	91.87	0.02	93.80	0.02
5	9	14481	2.853	108.6	123	111.453	119.5	118.12	0.03	121.22	0.03
6	11	17699	3.423	108.6	123	112.023	118.9	144.36	0.03	148.91	0.03
7	13	20917	3.994	108.6	123	112.594	118.3	170.61	0.04	176.89	0.04
8	15	24135	4.564	108.6	123	113.164	117.7	196.86	0.04	205.13	0.04
9	15.5	24939.5	5.135	108.6	123	113.735	117.1	203.42	0.05	213.04	0.05
10	17	27353	5.705	108.6	123	114.305	116.5	223.11	0.05	234.83	0.05
11	18.8	30249.2	6.276	108.6	123	114.876	115.9	246.73	0.06	260.99	0.06
12	19.8	31858.2	6.846	108.6	123	115.446	115.3	259.85	0.06	276.24	0.06
13	20.8	33467.2	7.417	108.6	123	116.017	114.8	272.98	0.07	291.62	0.07
14	21.7	34915.3	7.987	108.6	123	116.587	114.2	284.79	0.07	305.74	0.07
15	22	35398	8.558	108.6	123	117.158	113.6	288.73	0.08	311.48	0.08
16	22.4	36041.6	9.128	108.6	123	117.728	113.1	293.98	0.08	318.69	0.08
17	22.7	36524.3	9.699	108.6	123	118.299	112.5	297.91	0.09	324.52	0.09



3. Spesimen uji III



Data perhitungan tegangan-regangan teknik dan sebenarnya

spesimen III

x	y	P	ΔL	L0	A0	L1	A1	σ_{teknik}	ϵ_{teknik}	σ_{true}	ϵ_{true}
0	0	0	0.000	108.6	123	108.600	122.7	0	0.00	0.00	0.00
1	2	3348	0.571	108.6	123	109.171	122.0	27.31	0.01	27.45	0.01
2	3.6	6026.4	1.141	108.6	123	109.741	121.3	49.15	0.01	49.67	0.01
3	5	8370	1.712	108.6	123	110.312	120.8	68.24	0.02	69.31	0.02
4	7	11718	2.282	108.6	123	110.882	120.1	95.58	0.02	97.59	0.02
5	9	15066	2.853	108.6	123	111.453	119.5	122.89	0.03	126.12	0.03
6	11	18414	3.423	108.6	123	112.023	118.9	150.20	0.03	154.93	0.03
7	13	21762	3.994	108.6	123	112.594	118.3	177.50	0.04	184.03	0.04
8	15	25110	4.564	108.6	123	113.164	117.7	204.81	0.04	213.42	0.04
9	15.5	25947	5.135	108.6	123	113.735	117.1	211.64	0.05	221.65	0.05
10	17	28458	5.705	108.6	123	114.305	116.5	232.12	0.05	244.31	0.05
11	18.8	31471.2	6.276	108.6	123	114.876	115.9	256.70	0.06	271.53	0.06
12	19.8	33145.2	6.846	108.6	123	115.446	115.3	270.35	0.06	287.40	0.06
13	20.8	34819.2	7.417	108.6	123	116.017	114.8	284.01	0.07	303.40	0.07
14	21.7	36325.8	7.987	108.6	123	116.587	114.2	296.30	0.07	318.09	0.07
15	22	36828	8.558	108.6	123	117.158	113.6	300.39	0.08	324.06	0.08
16	22.4	37497.6	9.128	108.6	123	117.728	113.1	305.85	0.08	331.56	0.08
17	22.7	37999.8	9.699	108.6	123	118.299	112.5	309.95	0.09	337.63	0.09

2. LAMPIRAN PENGUJIAN INDENTASI

2.1 HASIL PENGUJIAN INDENTASI DENGAN DIAMETER INDENTOR 2.5 mm

beban kgf(N)	dia. indentasi			Pm	rumus Tabor				n		K		H	teg yield	teg ultimate	rata-rata teg.ultim
	d1 (m)	d2(m)	d rata-rata (m)	(N/m2)	teg (Mpa)	teg. rata-rata (Mpa)	reg (%)	reg. rata - rata (%)	n	n-rata - rata	K (Mpa)	K rata- rata (Mpa)		hawk (Mpa)	hawk (Mpa)	
31.2(306.5)	0.00085	0.00085	0.00085	540409494.63	193.00		0.088		0.292517		456.21		524.31	174.77	243.90	
31.2(306.5)	0.0008	0.0008	0.0008	610071656.05	217.88	201.30	0.084	0.07	-0.09046	0.16	525.10	479.17	594.03	198.01	291.44	259.8
31.2(306.5)	0.00085	0.00085	0.00085	540409494.63	193.00		0.088		0.292517		456.21		524.31	174.77	243.90	
62.5(612.9)	0.00115	0.00115	0.00115	590370004.70	210.85		0.092		0.452185		452.43		557.29	185.76	264.57	
62.5(612.9)	0.00115	0.00115	0.00115	590370004.70	210.85	210.85	0.092	0.09	0.452185	0.45	452.43	452.43	557.29	185.76	264.57	264.6
62.5(612.9)	0.00115	0.00115	0.00115	590370004.70	210.85		0.092		0.452185		452.43		557.29	185.76	264.57	
87.5(1838.75)	0.0018	0.0018	0.0018	722949595.03	258.20		0.144		0.387858		480.04		612.33	204.11	301.78	
87.5(1838.75)	0.0018	0.0018	0.0018	722949595.03	258.20	258.20	0.144	0.14	0.209344	0.33	480.04	480.04	612.33	204.11	301.78	301.8
87.5(1838.75)	0.0018	0.0018	0.0018	722949595.03	258.20		0.144		0.387858		480.04		612.33	204.11	301.78	

Keterangan : berdasarkan perhitungan didapatkan harga n dan K yaitu 0,32 dan 470,54 MPa

LABORATORIUM PENGUJIAN LOGAM & CNC
B L K I SURABAYA
Jl. Dukuh Menanggal III/29 Telp/fax (031)8293241
SURABAYA – JAWA TIMUR

Surat Keterangan

Yang bertanda tangan dibawah ini menerangkan bahwa :

Nama / NRP : HERY PRIYO UTOMO / 2106100514

Fak / Jurusan : Teknik Industri / Teknik Mesin

PTN / PTS : ITS SURABAYA

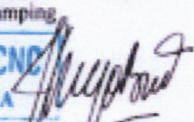
Mahasiswa tersebut diatas telah melakukan penelitian Uji Kekerasan di Laboratorium CNC BLKI Surabaya guna melengkapi data tugas akhir yang berjudul : **Study Eksperimental Perbandingan Pengujian Kekerasan dengan menggunakan Analisa Elemen Hingga**

Demikian surat keterangan ini dibuat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya

Surabaya, 24 Desember 2008

Pendamping

LAB. LOGAM & CNC
BLKI SURABAYA


PRIYO BUDI ATMIKO

ALLOY 7075

DESCRIPTION

Introduced by Alcoa in 1943, alloy 7075 has been the standard workhorse 7XXX series alloy within the aerospace industry ever since. It was the first successful Al-Zn-Mg-Cu high strength alloy using the beneficial effects of the alloying addition of chromium to develop good stress-corrosion cracking resistance in sheet products. Although other 7XXX alloys have since been developed with improved specific properties, alloy 7075 remains the baseline with a good balance of properties required for aerospace applications.

Alloy 7075 is available in bare and clad sheet and plate product forms in the annealed state as well as several tempers of the T6, T73 and T76 types.

APPLICATIONS

Alloy 7075 sheet and plate products have application throughout aircraft and aerospace structures where a combination of high strength with moderate toughness and corrosion resistance are required.

Typical applications are clad skin sheet, structural plate components up to 4 inches in thickness and general aluminum aerospace applications.

CHEMICAL COMPOSITION LIMITS (WT. %)

Si	0.40	Zn	5.1-6.1
Fe	0.50	Ti	0.20
Cu	1.2-2.0	Others, each	0.5
Mn	0.30	Others, total	0.15
Mg	2.1-2.9	Balance, Aluminum	
Cr	0.18-0.28		

Note: Value maximum if range not shown.

MECHANICAL PROPERTIES

ALLOY 7075 All values are minimum long transverse mechanical properties except where noted.

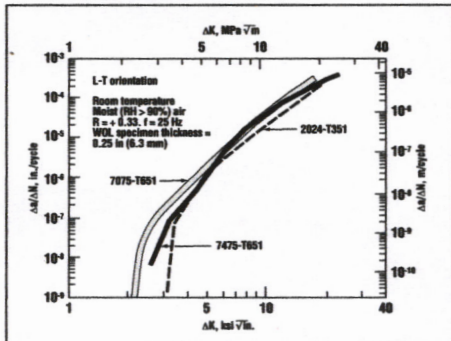
TEMPER	THICKNESS in. (mm)	TENSILE STRENGTH ksi (MPa)	YIELD STRENGTH ksi (MPa)	ELONGATION %
0 Sheet & plate	0.015-2.00 (0.38-50.80)	40 (max) (276)	21 (max) (145)	9-10
T6 Sheet	0.008-0.249 (0.203-6.32)	74-78 (510-538)	63-69 (434-476)	5-8
T651 Plate	0.250-4.000 (6.35-101.60)	78-67 (538-462)	67-54 (462-372)	9-3
T76 Sheet	0.125-0.249 (3.18-6.32)	73 (503)	62 (427)	8
T7651 Plate	0.250-1.000 (6.35-25.40)	72-71 (496-490)	61-60 (421-414)	8-6
T73 Sheet	0.040-0.249 (1.02-6.32)	67 (462)	56 (386)	8
T7351 Plate	0.250-4.000 (6.35-101.60)	69-61 (476-421)	57-48 (393-331)	7-6

ALLOY 7075

FATIGUE CRACK GROWTH

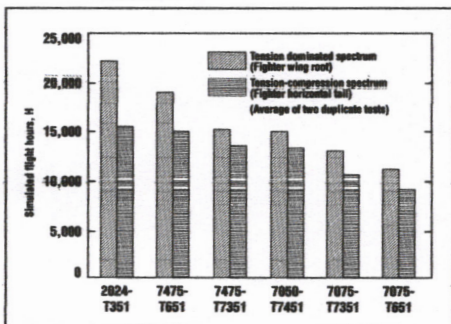
Fatigue crack growth rates for plate products of 7075-T6 in constant amplitude tests are compared with products of alloys 2024, 7050, and 7475.

COMPARISON OF FATIGUE CRACK GROWTH RATE DATA FOR ALLOY 7075-T651, 2024-T351 AND 7475-T651 PLATE



Fatigue crack growth behavior under spectrum loading is becoming increasingly important in the selection of alloys for fatigue critical aircraft structures. Various high strength aerospace alloys are compared for life prediction in flight hours using two types of fatigue spectrums; a wing root application (tension dominated), and a horizontal tail application (tension-compression).

SPECTRUM FATIGUE RANKING



Source: U.S. Navy Contract N00019-81-C-0550/Northrop Corp.

CORROSION RESISTANCE

Alloy 7075 has been thoroughly evaluated for corrosion resistance of atmospheric weathering, stress-corrosion cracking and exfoliation in all currently available tempers. These values have been used as a standard for comparison in the development of more recent high strength aerospace alloys. Within the 7XXX series of alloys, resistance to general corrosion attack, SCC and exfoliation improves significantly in the overage tempers (T7 type) compared with peak strength tempers (T6).

Generally, the T76 type temper is considered the exfoliation resistant temper, while the T73 type temper is considered the SCC resistant temper. It should be noted that T73 is as resistant to exfoliation as T76, but at lower strength levels.

For applications where good surface appearance is required or in corrosive environments, alclad 7075 sheet and plate products are recommended.

THERMAL TREATMENT

Many heat treatments and heat treating practices are available to develop optimum strength, toughness and other desirable characteristics for proper application of alloy 7075 sheet and plate products. Refer to MIL-H-6088, *Heat Treatment of Aluminum Alloys* for additional information.

PROCUREMENT SPECIFICATIONS

PLATE

Temper	T651	T7651
Specification	QQ-A-250/13	QQ-A-250/24
MIL-HDBK-5	Approved	

BARE SHEET

Specification	QQ-A-250/12,24	QQ-A-250/13,25,26
MIL-HDBK-5	Approved	Approved

ALCLAD SHEET

OTHER PRODUCT FORMS

Other product forms of alloy 7075 are extrusions, forgings, wire rod and bar, and rivets.

REFERENCES:

1. The Aluminum Association, *Standards and Data*.
2. The Aluminum Association, *Position on Fracture Toughness Requirements and Quality Control Testing T-5*.
3. MIL-H-6088, *Heat Treatment of Aluminum Alloys*.



PRODUCT SPECIFICATIONS ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE

ALCOA MILL PRODUCTS

P.O. BOX 8025 • BETTENDORF, IOWA 52722 • (800) 523-9596 • www.millproducts-alcoa.com

SPD-10-037

3. LAMPIRAN UNTUK METODE ELEMEN HINGGA

3.1 Command dalam melakukan pengujian

/BATCH

/PREP7

! Geometry input

R=1.25 ! RADIUS OF INDENTER

E_Mod=71700 ! ELASTICITY MODULUS OF

SAMPLE

mu=0.33 ! POISSON'S RATIO

s_yield=140 ! YIELD STRESS

H_Mod=57e3 ! HARDENING MODULUS

! Force input

Load=306.5 ! APPLIED MAX LOAD

T_L=100 ! TIME AT THE END OF

LOAD STEP 1

T_H=200 ! TIME AT THE END OF LOAD

STEP 2

T_U=300 ! TIME AT THE END OF

LOAD STEP 3

nstp=10 ! NUMBER OF SUBSTEP FOR

EACH LOAD STEP

!-----Main code-----!

ET,1,PLANE42 ! 2-D 4-NODE

KEYOPT,1,3,1 ! AXISYMMETRY OPTION FOR

PLANE42

ET,2,CONTA175 ! 2-D 1-NODE NODE-

TO-SURFACE CONTACT

ELEMENT

R,2,,1E1 ! SET SURFACE STIFFNESS

KEYOPT,2,5,1 ! CLOSE GAP

KEYOPT,2,9,1 ! EXCLUDE INITIAL PENETRATION

ET,3,TARGE169 ! 2-D TARGET ELEMENT

MP,EX,1,E_Mod ! ELASTOPLASTIC
MATERIAL BEHAVIOUR
MP,PRXY,1,mu
TB,BISO,1,1,2,
TB,DATA,,s_yield,H_Mod

!Draw rectangle in the global coordinate
L1=10 ! RADIUS OF SAMPLE
H1=10 ! THICKNESS OF SAMPLE
X1=0 ! X-COORDINATE OF LEFT CORNER
OF BOTTOM EDGE
Y1=-(R+H1) ! Y-COORDINATE OF LEFT
CORNER OF BOTTOM EDGE

BLC4,X1,Y1,L1,H1
ESIZE,0.6 ! SET ELEMENT DIVISION SIZE
AMESH,ALL ! MESH RECTANGLE AREA

!Create rigid target in the global coordinate
CSYS,1 ! SET COORDINAT SYSTEM TO
CYLINDRICAL
N,5001,R,-90
N,5002,R,0
N,5003,0 ! CENTER OF CIRCLE
NSEL,S,NODE,,5001,5003
TYPE,3
REAL,2

TSHAP,CARC ! SET TARGET SHAPE TO ARC
(HEMISPHERICAL)
E,5001,5002,5003 ! GENERATE TARGET
ELEMENTS
D,ALL,ALL,0 ! CONSTRAINT
NODES AT TARGET ELEMENT (ALL
DOF)

!Create contact element on the top edge of rectangle
CSYS,0 ! SET COORDINAT SYSTEM TO
CARTESIAN
NSEL,ALL

```

ESEL,S,TYPE,,1
NSLE
NSEL,R,LOC,Y,-R
TYPE,2
REAL,2
ESURF ! DEFINE CONTACT ELEMENTS
ALLSEL,ALL
FINISH
/SOL
/GO
NSEL,S,LOC,Y,-(R+H1)
DL,2,,UX,0
CP,1,UY,ALL ! COUPLING UY-DOF OF BOTTOM
EDGE OF THE SPECIMEN
NSEL,ALL
/GO
ANTYPE,0 ! STATIC ANALYSIS
ANTYPE,0
NLGEOM,0 ! 0-SMALL DISPLACEMENT, 1-
LARGE DISPLACEMENT
AUTOTS,0 ! 0-USER DEFINED TIME STEP, 1-
AUTOMATIC TIME STEP
!Load step 1
NSEL,S,LOC,Y,-(R+H1)
F,ALL,FY,Load ! APPLY LOAD AT BOTTOM EDGE
OF SAMPLE
NSEL,ALL
TIME,T_L
NSUBST,nstp,0,0 ! NUMBER OF SUBSTEP/DELTA-
LOAD
OUTRES,ALL,1 ! WRITE ALL SUBSTEP AS OUTPUT
LSWRITE,1, ! WRITE LOAD STEP 1
!Load step 2
TIME,T_H
LSWRITE,2, ! WRITE LOAD STEP 2
!Load step 3
NSEL,S,LOC,Y,-(R+H1)

```

FDELETE,ALL,ALL
 F,ALL,FY,0
 NSEL,ALL
 TIME,T_U
 LSWRITE,3,
 !Solve all load step
 LSSOLVE,1,3,1,
 FINISH

! WRITE LOAD STEP 3

PRINT 5 NODAL SOLUTION PER NODE

***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****
PowerGraphics is currently Enabled

LOAD STEP= 3 SUBSTEP= 10
TIME= 150.00 LOAD CASE= 0
NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL 1

NODE	S1	S2	S3	SINT	SEQW
1	0.79405	-0.59493E-01	0.73777E-01	0.86783	0.86078
2	0.63976E-01	0.50431E-01	0.21728	0.28125	0.24498
3	0.75981	-0.63750E-01	0.69615E-01	0.82826	0.82533
4	0.71196	-0.49228E-01	0.69817E-01	0.78178	0.77169
5	0.64329	-0.30315E-01	0.71058E-01	0.71435	0.69488
6	0.55692	-0.82427E-02	0.73067E-01	0.62999	0.60021
7	0.45964	-0.15022E-01	0.74864E-01	0.53450	0.49571
8	0.35795	0.37230E-01	0.76383E-01	0.43434	0.39014
9	0.25771	0.56503E-01	0.77486E-01	0.33520	0.29223
10	0.16374	0.71399E-01	0.78053E-01	0.24179	0.21133
11	0.89739E-01	0.70840E-01	0.78000E-01	0.16774	0.15913
12	0.90375E-01	0.20751E-02	0.77270E-01	0.16764	0.14535
13	0.92326E-01	0.60336E-01	0.75833E-01	0.16815	0.16097
14	0.91297E-01	0.73627E-01	0.11140	0.20270	0.18670
15	0.87923E-01	0.70649E-01	0.15147	0.23939	0.21033
16	0.82949E-01	0.66860E-01	0.18128	0.26423	0.22951
17	0.77012E-01	0.62236E-01	0.20169	0.27870	0.24136
18	0.70533E-01	0.56763E-01	0.21347	0.28406	0.24644
19	-0.20742E-02	0.31496	-0.95063	0.94856	0.83718
20	0.61476E-01	0.51434E-01	0.21782	0.27929	0.24335
21	0.53790E-01	0.54462E-01	0.21930	0.27309	0.23819
22	0.40313E-01	0.59569E-01	0.22129	0.26160	0.22865
23	0.20096E-01	0.66839E-01	0.22308	0.24317	0.21342
24	-0.80885E-02	0.76373E-01	0.22375	0.21566	0.19091
25	-0.45609E-01	0.88273E-01	0.22223	0.17662	0.15963
26	-0.93779E-01	0.10262	-0.21745	0.12367	0.11950
27	-0.11943	-0.15335	-0.20872	0.89288E-01	0.78066E-01
28	-0.13864	-0.19159	-0.22854	0.89899E-01	0.78255E-01
29	-0.16006	-0.17277E-01	0.31207	0.15201	0.14607
30	-0.14773	-0.18331	-0.40736	0.25963	0.24380
31	-0.11843	-0.20785	-0.51076	0.39233	0.36614
32	-0.86895E-01	0.23288	-0.61788	0.53099	0.47513
33	-0.55932E-01	0.25742	-0.72292	0.66697	0.59250
34	-0.28935E-01	0.28022	-0.81872	0.78974	0.69885
35	-0.93209E-02	0.29979	-0.89751	0.88819	0.78439
36	-220.70	-307.42	-533.34	312.04	279.56
37	-0.57700E-02	0.27798	-0.99955	0.99378	0.88948

***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****
 PowerGraphics Is Currently Enabled

LOAD STEP= 3 SUBSTEP= 10
 TIME= 150.00 LOAD CASE= 0
 NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL 1

NODE	S1	S2	S3	SINT	SEQV
38	-0.56047E-02	-0.23692	-1.0767	1.0710	0.97616
39	-0.62652E-02	-0.18995	-1.1866	1.1803	1.1000
40	-0.67561E-02	-0.13299	-1.3389	1.3321	1.2737
41	-0.73399E-02	-0.60120E-01	-1.5464	1.5391	1.5134
42	0.38380E-01	-0.75663E-02	-1.8272	1.8656	1.8431
43	0.17861	-0.71845E-02	-2.2060	2.3846	2.2974
44	0.39071	-0.26421E-02	-2.7127	3.1034	2.9266
45	0.72985	0.78105E-02	-3.3744	4.1043	3.7951
46	1.3260	0.56526E-01	-4.1555	5.4815	4.9699
47	2.4241	0.17117	-4.8710	7.2950	6.4698
48	4.5725	0.42805	-4.7668	9.3393	8.1051
49	8.9557	1.5042	-2.0815	11.037	9.7520
50	13.981	0.13449	-2.3849	16.366	15.263
51	19.866	5.4728	-17.873	37.740	32.988
52	101.01	41.985	-65.454	166.47	146.18
53	57.426	29.542	-75.597	133.02	121.50
54	-45.896	-55.154	-63.375	17.478	15.146
55	-36.176	-41.190	-58.414	22.238	20.203
56	-14.078	-20.311	-29.445	15.367	13.387
57	-3.5839	-7.4562	-12.347	8.7629	7.6060
58	2.2606	1.1605	-3.2719	5.5325	5.0727
59	3.3203	2.8634	-0.47466	3.7950	3.5884
60	1.5626	1.1700	0.90044	0.66216	0.57674
61	1.7486	0.60887	0.55249	1.1961	1.1689
62	1.6007	0.32103	0.31798	1.2827	1.2812
63	1.3911	0.17093	0.15196	1.2392	1.2298
64	1.2004	0.75541E-01	0.54600E-01	1.1458	1.1354
65	1.0472	0.15555E-01	-0.39058E-02	1.0511	1.0415
66	0.93296	-0.21712E-01	-0.39085E-01	0.97204	0.96348
67	0.85461	-0.43989E-01	-0.59674E-01	0.91429	0.90655
68	0.80901	-0.55799E-01	-0.70434E-01	0.87945	0.87222
69	0.77273	-0.60438E-01	-0.66256E-01	0.83899	0.83609
70	0.81576	-0.49773E-01	-0.55344E-01	0.87111	0.86833
71	0.88971	-0.29378E-01	-0.34547E-01	0.92425	0.92168
72	0.99783	0.54564E-02	0.85907E-03	0.99697	0.99468
73	1.1442	0.63201E-01	0.59360E-01	1.0849	1.0830
74	1.3325	0.15940	0.15670	1.1758	1.1745

***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****

PowerGraphics Is Currently Enabled

LOAD STEP= 3 SUBSTEP= 10
 TIME= 150.00 LOAD CASE= 0
 NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL 1

NODE	S1	S2	S3	SINT	SEQV
75	1.5612	0.32305	-0.32179	1.2394	1.2387
76	1.8096	0.61636	-0.61454	1.1950	1.1941
77	1.9854	1.1636	-1.1563	0.82916	0.82550
78	2.4811	2.3682	1.2871	1.1939	1.1417
79	3.4501	2.6509	-1.1679	4.6179	4.2748
80	-1.7474	-2.9727	-6.7313	4.9839	4.4982
81	-5.8624	-12.061	-16.160	10.297	8.9794
82	-6.8155	-20.777	-28.469	21.654	19.013
83	-4.8384	-30.269	-53.940	49.101	42.532
84	-12.025	-12.193	-61.622	49.597	49.513
85	0.72496	-0.46345E-01	-0.66733E-01	0.79169	0.78169
86	0.76439	-0.37017E-01	-0.56835E-01	0.82122	0.81149
87	0.83158	-0.19034E-01	-0.38018E-01	0.86960	0.86026
88	0.92857	0.11848E-01	-0.61547E-02	0.93473	0.92586
89	1.0576	0.63130E-01	0.46199E-01	1.0114	1.0030
90	1.2193	0.14782	0.13216	1.0871	1.0794
91	1.4085	0.29013	0.27660	1.1319	1.1252
92	1.6004	0.53491	0.52612	1.0743	1.0699
93	1.7180	0.98605	-0.97311	0.74485	0.73846
94	2.1332	1.9351	1.3093	0.82392	0.74489
95	4.0412	3.1466	-0.48215	4.5233	4.1490
96	1.4600	1.3243	-5.0599	6.5199	6.4531
97	-0.95316	-4.6392	-12.007	11.054	9.7485
98	-2.2096	-10.474	-20.426	18.216	15.798
99	1.0109	-7.9308	-24.467	25.477	22.388
100	1.1054	-1.2144	-27.462	28.567	27.481
101	0.65475	-0.28184E-01	-0.68295E-01	0.72304	0.70384
102	0.68936	-0.21267E-01	-0.59446E-01	0.74880	0.73046
103	0.74749	-0.75552E-02	-0.42704E-01	0.79020	0.77322
104	0.82956	0.16620E-01	-0.14557E-01	0.84412	0.82897
105	0.93518	0.57389E-01	0.31107E-01	0.90407	0.89122
106	1.0613	0.12517	0.10500	0.95634	0.94642
107	1.1973	0.23776	0.22566	0.97167	0.96568
108	1.3146	0.42920	0.42920	0.88539	0.88539
109	1.3496	0.78479	0.75693	0.59265	0.57923
110	1.6080	1.4863	0.99022	0.61777	0.56680
111	2.7781	2.6287	-0.88213E-01	2.8663	2.7946

***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****

PowerGraphics Is Currently Enabled

LOAD STEP= 3 SUBSTEP= 10

TIME= 150.00 LOAD CASE= 0

NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL 1

NODE	S1	S2	S3	SINT	SEQV
112	4.3145	3.1745	-3.0104	7.3249	6.8267
113	2.5309	2.3983	-7.7961	10.327	10.261
114	1.8273	0.39251	-12.915	14.742	14.080
115	0.76902	-0.49413E-01	-18.411	19.180	18.785
116	7.4062	-1.6391	-19.840	27.246	24.036
117	0.56651	-0.68862E-02	-0.70625E-01	0.63713	0.60778
118	0.59565	-0.27897E-02	-0.62824E-01	0.65848	0.63061
119	0.64348	0.61317E-02	-0.48141E-01	0.69162	0.66614
120	0.70855	0.23139E-01	-0.23689E-01	0.73224	0.70998
121	0.78785	0.53346E-01	0.15484E-01	0.77237	0.75415
122	0.87471	0.10468	0.77530E-01	0.79718	0.78396
123	0.95495	0.19043	0.17661	0.77834	0.77152
124	0.99842	0.33640	0.33192	0.66651	0.66427
125	0.96521	0.60654	0.56287	0.40234	0.38238
126	1.0409	1.0383	0.61354	0.42732	0.42606
127	1.7502	1.5959	0.19465E-01	1.7308	1.6590
128	2.7353	2.1457	-1.7590	4.4943	4.2304
129	3.9729	2.4290	-4.3366	8.3094	7.6552
130	4.8290	1.5844	-8.2004	13.029	11.748
131	5.6200	0.98041	-11.163	16.783	15.011
132	5.8702	0.98310	-11.474	17.344	15.490
133	0.46743	0.15408E-01	-0.72794E-01	0.54023	0.50197
134	0.49141	0.16066E-01	-0.66195E-01	0.55760	0.52136
135	0.52936	0.19386E-01	-0.53838E-01	0.58320	0.55026
136	0.57822	0.28452E-01	-0.33418E-01	0.61164	0.58317
137	0.63294	0.47503E-01	-0.11448E-02	0.63408	0.61121
138	0.68486	0.82572E-01	0.49135E-01	0.63572	0.61968
139	0.71841	0.14224	0.12699	0.59142	0.58394
140	0.70816	0.24882	0.23998	0.46818	0.46382
141	0.61117	0.43477	0.38322	0.22796	0.20705
142	0.71789	0.62476	0.32505	0.39284	0.35554
143	1.1104	0.88221	-0.20996	1.3204	1.2224
144	1.6079	1.1307	-1.1515	2.7594	2.5544
145	2.0688	1.1197	-2.6440	4.7129	4.3173
146	2.5901	1.2143	-4.7396	7.3297	6.7479
147	2.8746	1.1159	-6.8311	9.7058	8.9569
148	3.4797	0.65382	-6.2852	9.7649	8.7032

***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****

PowerGraphics Is Currently Enabled

LOAD STEP= 3 SUBSTEP= 10
 TIME= 150.00 LOAD CASE= 0
 NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL 1

NODE	S1	S2	S3	SINT	SEQV
149	0.36440	0.36333E-01	-0.74696E-01	0.43910	0.39545
150	0.38444	0.32808E-01	-0.69323E-01	0.45376	0.41230
151	0.41442	0.29773E-01	-0.59290E-01	0.47371	0.43605
152	0.44986	0.30467E-01	-0.42819E-01	0.49268	0.46043
153	0.48454	0.38602E-01	-0.17036E-01	0.50158	0.47620
154	0.50917	0.58538E-01	0.22394E-01	0.48677	0.46974
155	0.50954	0.95929E-01	0.82120E-01	0.42742	0.42069
156	0.46301	0.17079	0.15643	0.30658	0.29966
157	0.33730	0.30069	0.24649	0.90815E-01	0.79138E-01
158	0.48120	0.36396	0.83344E-01	0.39786	0.35410
159	0.71750	0.49405	-0.35544	1.0729	0.98050
160	0.98583	0.59028	-1.0517	2.0375	1.8714
161	1.3097	0.70582	-1.9970	3.3067	3.0500
162	1.5222	0.66762	-3.2668	4.7890	4.4241
163	1.7244	0.49290	-4.2592	5.9836	5.4728
164	2.1191	0.31401	-4.4210	6.5401	5.8503
165	0.26374	0.53708E-01	-0.76169E-01	0.33991	0.29709
166	0.28214	0.44729E-01	-0.71975E-01	0.35411	0.31255
167	0.30708	0.34437E-01	-0.64149E-01	0.37123	0.33307
168	0.33285	0.26672E-01	-0.51335E-01	0.38419	0.35173
169	0.35285	0.24708E-01	-0.31442E-01	0.38430	0.35952
170	0.35845	0.31713E-01	-0.13978E-02	0.35985	0.34449
171	0.33742	0.50711E-01	0.42866E-01	0.29456	0.29071
172	0.27325	0.10672	0.84358E-01	0.18889	0.17876
173	0.19535	0.16097	0.11482	0.80538E-01	0.69996E-01
174	0.31317	0.20470	-0.92915E-01	0.40608	0.36417
175	0.45713	0.27018	-0.45078	0.90791	0.83037
176	0.62850	0.33810	-0.95525	1.5838	1.4604
177	0.78679	0.35602	-1.6285	2.4153	2.2313
178	0.93169	0.31202	-2.3606	3.2923	3.0303
179	1.0836	0.21467	-2.9801	4.0637	3.7064
180	1.2413	0.10189	-3.4701	4.7114	4.2576
181	0.17176	0.64693E-01	-0.77085E-01	0.24884	0.21620
182	0.19267	0.47383E-01	-0.73995E-01	0.26667	0.23125
183	0.21581	0.29023E-01	-0.68208E-01	0.28401	0.25001
184	0.23513	0.13554E-01	-0.58717E-01	0.29385	0.26521
185	0.24494	0.32998E-02	-0.44014E-01	0.28895	0.26844

***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****

PowerGraphics Is Currently Enabled

LOAD STEP= 3 SUBSTEP= 10

TIME= 150.00 LOAD CASE= 0

NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL 1

NODE	S1	S2	S3	SINT	SEQV
186	0.23809	0.77305E-04	-0.22058E-01	0.26014	0.24981
187	0.20549	0.97728E-02	0.51871E-02	0.20030	0.19804
188	0.13797	0.54294E-01	0.16224E-01	0.12174	0.10787
189	0.11419	0.76690E-01	-0.23404E-01	0.13760	0.12320
190	0.19010	0.98805E-01	-0.21200	0.40209	0.36511
191	0.28181	0.13576	-0.49871	0.78052	0.71871
192	0.37933	0.16170	-0.88517	1.2645	1.1710
193	0.47677	0.16465	-1.3503	1.8271	1.6927
194	0.56796	0.13481	-1.8497	2.4176	2.2328
195	0.65419	0.81869E-01	-2.3307	2.9849	2.7439
196	0.72418	0.30700E-01	-2.8020	3.5262	3.2357
197	0.10648	0.53916E-01	-0.77356E-01	0.18384	0.16400
198	0.13051	0.28983E-01	-0.75286E-01	0.20580	0.17823
199	0.15052	0.62502E-02	-0.71362E-01	0.22188	0.19502
200	0.16338	-0.13146E-01	-0.64850E-01	0.22823	0.20727
201	0.16490	-0.28147E-01	-0.54704E-01	0.21960	0.20760
202	0.14974	-0.37920E-01	-0.39559E-01	0.18930	0.18848
203	0.11201	-0.17857E-01	-0.42960E-01	0.15497	0.14406
204	0.52174E-01	0.11991E-01	-0.52141E-01	0.10432	0.91130E-01
205	0.50991E-01	0.16207E-01	-0.12233	0.17332	0.15881
206	0.99427E-01	0.25252E-01	-0.28607	0.38550	0.35429
207	0.15482	0.43472E-01	-0.52085	0.67567	0.62745
208	0.21412	0.58139E-01	-0.81860	1.0327	0.96424
209	0.27241	0.60310E-01	-1.1664	1.4388	1.3454
210	0.32710	0.48262E-01	-1.5400	1.8671	1.7445
211	0.37380	0.26810E-01	-1.9198	2.2936	2.1413
212	0.40073	0.41365E-02	-2.3059	2.7066	2.5317
213	0.94716E-01	-0.35606E-02	-0.76926E-01	0.17164	0.14917
214	0.10512	-0.18165E-01	-0.75791E-01	0.18091	0.16007
215	0.11461	-0.35778E-01	-0.73555E-01	0.18817	0.17241
216	0.11817	-0.53104E-01	-0.69701E-01	0.18787	0.18015
217	0.11132	-0.63513E-01	-0.68301E-01	0.17962	0.17727
218	0.89597E-01	-0.54117E-01	-0.80569E-01	0.17017	0.15860
219	0.49690E-01	-0.40568E-01	-0.91394E-01	0.14108	0.12376
220	-0.22439E-02	-0.22063E-01	-0.11299	0.11074	0.10228
221	0.18736E-02	-0.30812E-01	-0.18755	0.18943	0.17538
222	0.30808E-01	-0.28964E-01	-0.32955	0.36036	0.33450

***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****
 PowerGraphics is currently Enabled

LOAD STEP= 3 SUBSTEP= 10
 TIME= 150.00 LOAD CASE= 0
 NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL 1

NODE	S1	S2	S3	SINT	SEQV
223	0.63601E-01	-0.17091E-01	-0.52381	0.58741	0.55151
224	0.97974E-01	-0.48786E-02	-0.76250	0.86047	0.81393
225	0.13169	0.30050E-02	-1.0349	-1.1666	1.1079
226	0.16189	0.46219E-02	-1.3275	-1.4894	1.4173
227	0.18438	0.93842E-03	-1.6270	-1.8114	1.7270
228	0.19248	-0.58045E-02	-1.9228	2.1153	2.0234
229	0.93309E-01	-0.63395E-01	-0.75753E-01	0.16906	0.16323
230	0.95454E-01	-0.72040E-01	-0.75469E-01	0.17092	0.16923
231	0.95747E-01	-0.74755E-01	-0.84098E-01	0.17985	0.17536
232	0.90580E-01	-0.73255E-01	-0.97399E-01	0.18798	0.17715
233	0.76154E-01	-0.70496E-01	-0.11024	0.18639	0.17004
234	0.48892E-01	-0.65922E-01	-0.12184	0.17073	0.15076
235	0.70241E-02	-0.58983E-01	-0.13392	0.14094	0.12214
236	-0.41720E-01	-0.49235E-01	-0.15827	0.11655	0.11298
237	-0.36550E-01	-0.68897E-01	-0.22772	0.19117	0.17722
238	-0.21188E-01	-0.69340E-01	-0.35123	0.33005	0.30880
239	-0.39818E-02	-0.58721E-01	-0.51557	0.51159	0.48654
240	0.13901E-01	-0.44545E-01	-0.71241	0.72631	0.69892
241	0.30853E-01	-0.30755E-01	-0.93334	0.96419	0.93491
242	0.44867E-01	-0.19597E-01	-1.1678	-1.2127	1.1818
243	0.53101E-01	-0.12300E-01	-1.4041	-1.4572	1.4256
244	0.51919E-01	-0.96203E-02	-1.6286	-1.6806	1.6507
245	0.90742E-01	-0.73804E-01	-0.11344	0.20418	0.18753
246	0.88548E-01	-0.74288E-01	-0.11923	0.20778	0.18935
247	0.82962E-01	-0.74932E-01	-0.12771	0.21067	0.18987
248	0.71495E-01	-0.75505E-01	-0.13751	0.20901	0.18593
249	0.51269E-01	-0.75701E-01	-0.14735	0.19862	0.17422
250	0.19562E-01	-0.75178E-01	-0.15656	0.17612	0.15267
251	-0.24557E-01	-0.73606E-01	-0.16662	0.14206	0.12498
252	-0.70750E-01	-0.73394E-01	-0.18788	0.11713	0.11583
253	-0.66537E-01	-0.10054	-0.24929	0.18275	0.16834
254	-0.61152E-01	-0.10064	-0.35811	0.29696	0.27932
255	-0.55021E-01	-0.88508E-01	-0.50010	0.44507	0.42931
256	-0.48852E-01	-0.71151E-01	-0.66678	0.61792	0.60708
257	-0.43579E-01	-0.52157E-01	-0.85057	0.80699	0.80274
258	-0.34245E-01	-0.40472E-01	-1.0424	-1.0081	1.0050
259	-0.19809E-01	-0.41134E-01	-1.2312	-1.2114	1.2009

***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****

PowerGraphics is Currently Enabled

LOAD STEP= 3 SUBSTEP= 10

TIME= 150.00 LOAD CASE= 0

NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL 1

NODE	S1	S2	S3	SINT	SEQV
260	-0.11088E-01	-0.47315E-01	-1.4038	1.3927	1.3749
261	0.86457E-01	-0.71048E-01	-0.15290	0.23936	0.21071
262	0.81653E-01	-0.72215E-01	-0.15697	0.23863	0.20952
263	0.72299E-01	-0.74061E-01	-0.16298	0.23528	0.20577
264	0.56563E-01	-0.76443E-01	-0.16995	0.22652	0.19716
265	0.32238E-01	-0.79177E-01	-0.17685	0.20909	0.18120
266	-0.27891E-02	-0.82059E-01	-0.18299	0.18020	0.15643
267	-0.49156E-01	-0.84894E-01	-0.18935	0.14020	0.12618
268	-0.87536E-01	-0.99872E-01	-0.20455	0.11701	0.11136
269	-0.89928E-01	-0.12754	-0.25734	0.16741	0.15214
270	-0.92125E-01	-0.12554	-0.35508	0.26295	0.24794
271	-0.94316E-01	-0.11064	-0.48065	0.38633	0.37844
272	-0.89803E-01	-0.96813E-01	-0.62528	0.53548	0.53201
273	-0.66499E-01	-0.10007	-0.78199	0.71549	0.69931
274	-0.43675E-01	-0.10468	-0.94251	0.89884	0.86994
275	-0.24362E-01	-0.11135	-1.0968	1.0724	1.0317
276	-0.11630E-01	-0.12073	-1.2330	1.2213	1.1706
277	0.80912E-01	-0.67454E-01	-0.18231	0.26322	0.22857
278	0.74483E-01	-0.69220E-01	-0.18520	0.25968	0.22532
279	0.62740E-01	-0.72112E-01	-0.18942	0.25216	0.21855
280	0.44252E-01	-0.76058E-01	-0.19415	0.23840	0.20646
281	0.17251E-01	-0.80962E-01	-0.19846	0.21571	0.18706
282	-0.20015E-01	-0.86715E-01	-0.20157	0.18156	0.15907
283	-0.68273E-01	-0.93207E-01	-0.20378	0.13551	0.12492
284	-0.10034	-0.12204	-0.21149	0.11115	0.10205
285	-0.10804	-0.15085	-0.25576	0.14772	0.13165
286	-0.11626	-0.14537	-0.34599	0.22973	0.21664
287	-0.12500	-0.12714	-0.45980	0.33480	0.33373
288	-0.10304	-0.13427	-0.58842	0.48538	0.47054
289	-0.76263E-01	-0.14411	-0.72549	0.64922	0.61810
290	-0.49874E-01	-0.15462	-0.86348	0.81361	0.76662
291	-0.27199E-01	-0.16581	-0.99327	0.96607	0.90476
292	-0.11816E-01	-0.17772	-1.1045	1.0927	1.0199
293	0.74641E-01	-0.62997E-01	-0.20244	0.27708	0.23996
294	0.67275E-01	-0.65275E-01	-0.20453	0.27180	0.23541
295	0.54163E-01	-0.69062E-01	-0.20749	0.26165	0.22673
296	0.34122E-01	-0.74342E-01	-0.21059	0.24471	0.21238

***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****
 PowerGraphics Is Currently Enabled

LOAD STEP= 3 SUBSTEP= 10
 TIME= 150.00 LOAD CASE= 0
 NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL 1

NODE	S1	S2	S3	SINT	SEQV
297	0.56635E-02	-0.81087E-01	-0.21291	0.21858	0.19063
298	-0.32775E-01	-0.89265E-01	-0.21353	0.18076	0.16017
299	-0.82218E-01	-0.98825E-01	-0.21205	0.12983	0.12237
300	-0.10970	-0.13964	-0.21194	0.10224	0.91038E-01
301	-0.12181	-0.17072	-0.24768	0.12587	0.10991
302	-0.13503	-0.16043	-0.33395	0.19892	0.18752
303	-0.13888	-0.14919	-0.43959	0.30071	0.29569
304	-0.11204	-0.16407	-0.55676	0.44472	0.42112
305	-0.82648E-01	-0.17939	-0.67985	0.59720	0.55519
306	-0.53728E-01	-0.19482	-0.80205	0.74832	0.68870
307	-0.28895E-01	-0.20994	-0.91508	0.88619	0.81097
308	-0.11787E-01	-0.22416	-1.0095	0.99775	0.91034
309	0.68065E-01	-0.57661E-01	-0.21406	0.28213	0.24481
310	0.60305E-01	-0.60363E-01	-0.21569	0.27599	0.23964
311	0.46649E-01	-0.64892E-01	-0.21791	0.26456	0.23005
312	0.26068E-01	-0.71281E-01	-0.22002	0.24609	0.21467
313	-0.27583E-02	-0.79569E-01	-0.22111	0.21835	0.19184
314	-0.41290E-01	-0.89786E-01	-0.22012	0.17883	0.16019
315	-0.90828E-01	-0.10194	-0.21613	0.12530	0.12013
316	-0.11601	-0.15119	-0.20950	0.93493E-01	0.81789E-01
317	-0.13190	-0.18635	-0.23615	0.10426	0.90319E-01
318	-0.14943	-0.17020	-0.32165	0.17222	0.16283
319	-0.14603	-0.16832	-0.42158	0.27555	0.26511
320	-0.11731	-0.18816	-0.53067	0.41337	0.38289
321	-0.86247E-01	-0.20840	-0.64413	0.55788	0.50794
322	-0.55724E-01	-0.22834	-0.75574	0.70001	0.63165
323	-0.29361E-01	-0.24719	-0.85793	0.82857	0.74397
324	-0.11703E-01	-0.26412	-0.94204	0.93034	0.83331

MINIMUM VALUES

NODE	36	36	36	173	173
VALUE	-220.70	-307.42	-533.34	0.80538E-01	0.69996E-01

MAXIMUM VALUES

NODE	52	52	94	36	36
VALUE	101.01	41.985	1.3093	312.64	279.56

