

**KAJI PARAMETRIK KASUS TUMBUKAN KECEPATAN
RENDAH PADA TABUNG SEGI-EMPAT DAN SEGI-ENAM
MENGUNAKAN METODE EKSPERIMEN DAN METODE
NUMERIK**

Tesis

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan tingkat pasca sarjana di Program Studi Aeronotika dan Astronotika
Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara
Institut Teknologi Bandung

Oleh :

**Bismil Rabeta
23608003**

Pembimbing :

**Dr. Leonardo Gunawan
Dr. Tatacipta Dirgantara
Dr. Ichsan Setya Putra**



**PROGRAM STUDI AERONOTIKA DAN ASTRONOTIKA
FAKULTAS TEKNIK MESIN DAN DIRGANTARA
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG
Sekolah Pascasarjana
2011**

**KAJI PARAMETRIK KASUS TUMBUKAN KECEPATAN
RENDAH PADA TABUNG SEGI-EMPAT DAN SEGI-ENAM
MENGUNAKAN METODE EKSPERIMEN DAN METODE
NUMERIK**

**Oleh
Bismil Rabeta
NIM : 236 03 8003**

**Program Studi Aeronotika dan Astronotika
Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara
Institut Teknologi Bandung**

**Disetujui oleh Pembimbing
Tanggal : _____**

Pembimbing :

Dr.Leonardo Gunawan

Dr. Tatacipta Dirgantara

Prof.Dr. Ichsan Setya Putra

ABSTRACT

Crashworthiness is an endurance test of a structure to the effects of collision. This test usually performed to investigate the safety vehicle due to effect of collision. Testing can be done using software such as LS-DYNA, MSC-DYTRAN, MADYMO or experiment testing. The most important part on the vehicle that was very influential to the effect of the collision is bumper. Bumper mounted on the front of the vehicle, which is a system can absorb impact energy during a collision occurred in front of the vehicle. Two important mechanism in the bumper system are the frontal bar and longitudinal member. Frontal bar directly contact with source of the impact energy caused collision. Then distributed to longitudinal member to absorbed with deformation process. Deformation behaviour of the longitudinal member will determine the level safety of passenger vehicles.

In this thesis, an experimental low velocity impact analysis using a drop weight test equipment were conducted for hexagonal and square prismatic thin wall tubes, which are common type of structures used as longitudinal member of a car bumper system. The results` were the compared to non linear finite element analysis results obtained using LS-DYNA.

A parametric analysis study the effect of the circumference to thickness ratio, to *mean crushing force* were conducted based on analytical, numerical and experimental result.

All method shows that the value of the normalized crushing force P_m/M_0 of hexagonal column is higher than those of square tube. The analytical value of normalized crushing force, P_m/M_0 of hexagonal tube is about 1.19 - 1.28 times higher than those of the square tube. The numerical values is about 1.38 - 1.56 times higher, while the experimental results shows that the P_m/M_0 of hexagonal tubes are 1.20 – 1.72 times higher than those of square tube. It can be concluded that the hexagonal tube has a better capability in absorbing impact energy compared to the square tube.

Keyword : Bumper system, longitudinal, square tube, hexagonal tube, *mean crushing force*, low velocity impact, progressive buckling.

ABSTRAK

Crasworthiness merupakan sebuah pengujian ketahanan suatu struktur terhadap efek tumbukan. Pengujian ini biasanya dilakukan untuk menyelidiki keamanan kendaraan terhadap efek tumbukan. Pengujian dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak seperti LS-DYNA, MSC-DYTRAN, MADYMO atau dapat juga dilakukan dengan menggunakan pengujian eksperimen. Bagian terpenting pada kendaraan yang sangat berpengaruh terhadap efek tumbukan adalah *Bumper*. *Bumper* dipasang pada bagian depan kendaraan yang merupakan suatu sistem yang berguna untuk menyerap energi tumbukan ketika terjadi kecelakaan pada bagian depan kendaraan. Dua mekanisme penting pada sistem bumper adalah *frontal bar* dan batang *longitudinal*. *Frontal bar* akan langsung berinteraksi dengan sumber tumbukan. Gaya tumbukan dari *frontal bar* akan diteruskan ke batang *longitudinal* untuk diserap dengan cara berdeformasi (*progressive buckling*). Perilaku deformasi dari struktur batang *longitudinal* akan menentukan tingkat keselamatan pada penumpang kendaraan.

Pada tesis ini dilakukan analisis eksperimen tumbuk kecepatan rendah menggunakan alat *drop weight test* pada struktur tabung berdinding tipis dengan penampang tabung berbentuk segi-empat dan segi-enam. Struktur tabung yang digunakan untuk analisis eksperimen tersebut merupakan jenis umum dari struktur yang digunakan sebagai batang *longitudinal* pada *bumper* mobil. Hasil analisis dari eksperimen yang dilakukan dibandingkan dengan hasil analisis metode elemen hingga non-linier yang didapatkan dengan menggunakan perangkat lunak LS-DYNA. Analisis parametric juga dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari rasio tebal per keliling terhadap harga *mean crushing force* berdasarkan hasil dari analitikal, numerikal dan eksperimental.

Semua metode yang digunakan dalam analisis parametrik menunjukkan bahwa harga *normalized mean crushing force*, P_m/M_0 tabung hexagonal lebih tinggi dari pada tabung segi-empat. Hasil analitikal dari harga *normalized mean crushing force*, P_m/M_0 tabung segi-enam sebesar 1.19 – 1.28 kali dari tabung segi-empat. Hasil numerikal dari *normalized mean crushing force*, P_m/M_0 tabung segi-enam sebesar 1.38 – 1.56 kali dari tabung segi-empat, sedangkan hasil

eksperimental dari *normalized mean crushing force*, P_m/M_0 tabung segi-enam sebesar 1.20-1.72 kali dari tabung segi-empat.

Kata Kunci : Sistem *bumper*, *longitudinal*, tabung segi-empat, tabung segi-enam, gaya penghancur rata – rata, parametrik, tumbukan kecepatan rendah, *progressive buckling*.

DAFTAR ISI

ABSTRACT	ii
ABSTRAK	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR SIMBOL	xi
DAFTAR TABEL	xii
Bab 1 Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	4
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Metodologi penelitian	5
1.5 Sistematika Penulisan	7
2.1 Crashworthiness	9
2.2 Tumbukan	10
2.2.1 Mekanika klasik	11
2.2.2 Propagasi gelombang elastik	11
2.2.3 Mekanika Kontak	12
2.2.4 Deformasi Plastis	12
2.3 Karakteristik tumbukan pada elemen elastoplastic	13
2.3.1 Tabung Segi-empat	15
2.3.2 Tabung Segi-Enam	17
2.4 Efek Inersia	18
Bab 3 Pemodelan numerik	20
3.1 Geometri Struktur	20
3.2 Ukuran elemen	20
3.2.1 Studi konvergensi	20
3.3 Dimensi penampang tabung berdinding tipis	22
3.3.1 Penumbuk (<i>impactor</i>)	23
3.3.2 Tabung spesimen	24
3.4 Data material	26

3.4.1	Material tabung	26
3.4.2	Material penumbuk (<i>impactor</i>)	28
3.5	Kondisi pembebanan dan kondisi batas	29
3.6	Kondisi kontak	29
3.7	Termination time	30
3.8	Output data	30
Bab 4	Eksperimen tumbuk kecepatan rendah dan pengolahan data	32
4.1	Alat uji tumbuk.....	33
4.1.1	Katrol elektrik	33
4.1.2	Jepitan Pemberat	33
4.1.3	Pengarah Pemberat	34
4.2	Sistem sensor gaya.....	36
4.2.1	Load cell	36
4.2.2	Signal conditioner dan sensor kecepatan	37
4.3	Persiapan eksperimen uji tumbuk.....	40
4.3.1	Persiapan tabung spesimen	40
4.3.2	Pembuatan tabung spesimen	41
4.3.3	Uji tarik.....	43
4.3.4	Pengujian <i>Microhardness Vicker</i>	44
4.3.5	Kalibrasi <i>load cell</i>	45
4.3.6	Analisis gambar hasil dokumentasi.....	47
4.4	Prosedur pengujian tumbuk tabung eksperimen	48
Bab 5	Hasil analisis	50
5.1	Detil geometri penampang tabung segi-empat dan segi-enam untuk eksperimen uji tumbuk.....	50
5.1.1	Tabung segi-empat	50
5.1.2	Tabung segi-enam	52
5.2	Hasil uji tumbuk tabung segi-empat dan segi-enam menggunakan metode eksperimen dan metode numerik.....	54
5.2.1	Hasil eksperimen tabung segi-empat.....	54
5.2.2	Hasil eksperimen tabung segi-enam.....	58
5.2.3	Hasil numerik tabung segi-empat.....	60

5.2.4	Hasil numerik tabung segi-enam.....	63
5.3	Perbandingan pola lipat tabung segi-empat dan segi enam dari hasil metode numerik dan metode eksperimen.....	66
5.3.1	Tabung segi-empat	66
5.3.2	Tabung segi-enam	69
5.4	Perbandingan harga P_m tabung segi-empat dan tabung segi-enam dari hasil metode analitik, metode numerik dan metode eksperimen.....	71
5.4.1	Tabung segi-empat	72
5.4.2	Tabung segi-enam	75
5.5	Perbandingan harga P_m antara tabung segi-empat dan segi- enam dengan menggunakan metode analitik, metode numerik , dan metode eksperimen.	78
5.6	Parameter non-dimensional $P_m/M_o - t$ /keliling untuk penampang segi-empat dan segi-enam.....	80
5.6.1	Tabung segi-empat	80
5.6.2	Tabung segi-enam	81
5.7	Parameter non-dimensional $\eta - \phi$ untuk penampang segi-empat dan segi-enam	83
5.7.1	Tabung segi-empat	84
5.7.2	Tabung segi-enam	85
Bab 6	Kesimpulan dan saran.....	88
6.1	Kesimpulan	88
6.2	Saran	90
	DAFTAR PUSTAKA	91

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Distribusi kecelakaan mobil di dunia berdasarkan tipe tabrakan [3]... 1	1
Gambar 1.2 Stuktur bumper kendaraan [4]..... 2	2
Gambar 1.3 Flow chart langkah pengerjaan tesis..... 6	6
Gambar 2.1 Propagasi elastic wave 12	12
Gambar 2.2 Kurva <i>force-displacement</i> untuk tabung yang ditumbuk dengan massa yang bergerak..... 14	14
Gambar 2.3 Deformasi baja setelah mengalami pembebanan quasi-static [15]... 15	15
Gambar 2.4 Box column (a) Pola deformasi; (b) superfolding elemen [16] 15	15
Gambar 2.5 Komposisi dari basic superfolding elemen [16]..... 16	16
Gambar 2.6 (a) Elemen dasar tipe extensional collapse (b) Perubahan bagian dari elemen dasar pada gambar(a) [18] 18	18
Gambar 2.7 Hasil tes quasi-static. (a) Tabung segi-empat yang mengalami deformasi, (b) kurva <i>force-deformation</i> , (c) <i>mean crushing force</i> dari tabung [15] 19	19
Gambar 2.8 Hasil akhir tes pembebanan dinamik pada tabung segi-empat. (a) 5 m/s; (b) 10 m/s; (c) 15 m/s [15] 19	19
Gambar 3.1 efek dari ukuran elemen terhadap perilaku tabung oktagon..... 21	21
Gambar 3.2 Studi konvergensi 22	22
Gambar 3.3 Menunjukkan geometri dari tabung yang dianalisis 23	23
Gambar 3.4 Hasil pemodelan <i>Impactor</i> 23	23
Gambar 3.5 Pemodelan meshing penumbuk 24	24
Gambar 3.6 model tabung , (a) tabung segi-empat; (b) tabung segi-enam..... 25	25
Gambar 4.1 Skema alat uji tumbuk 32	32
Gambar 4.2 Katrol Elektrik 33	33
Gambar 4.3 Jepitan Pemberat [6] 34	34
Gambar 4.4 Pengarah pemberat [6] 35	35
Gambar 4.5 Alat Uji tumbuk 36	36
Gambar 4.6 Load cell dan komponennya 37	37
Gambar 4.7 Sistem Akusisi Data..... 38	38
Gambar 4.8 Skema sistem sensor gaya 39	39
Gambar 4.9 <i>Cutting material</i> AL 6061 T4 dengan alat CNC 42	42

Gambar 4.10 <i>Pressing material</i> AL 6061 T4 dengan alat CNC	42
Gambar 4.11 Pengelasan material AL 6061 T4	43
Gambar 4.12 Ukuran uji tarik (a). Defenisi ukuran tiap bagian (b)Ukuran dalam satuan millimeter (<i>mm</i>).....	44
Gambar 4.13 alat uji kompresi	46
Gambar 4.14 Diagram beban – output Voltase yang dihasilkan	47
Gambar 5.1 Geometri penampang tabung segi-empat.....	51
Gambar 5.2 Geometri penampang tabung segi-enam.....	53
Gambar 5.3 Hasil uji tumbuk tabung berpenampang segi-empat	55
Gambar 5.4 Grafik <i>instantaneous force</i> untuk tabung segi-empat dengan keliling yang bervariasi	57
Gambar 5.5 Grafik <i>mean crushing force</i> untuk tabung segi-empat dengan keliling yang bervariasi	57
Gambar 5.6 Hasil uji tumbuk tabung berpenampang segi-enam	58
Gambar 5.7 Grafik <i>instantaneous force</i> untuk tabung segi-enam dengan keliling yang bervariasi	59
Gambar 5.8 Grafik <i>mean crushing force</i> untuk tabung segi-enam dengan keliling yang bervariasi	60
Gambar 5.9 Hasil simulasi uji tumbuk tabung berpenampang segi-empat.....	61
Gambar 5.10 Grafik <i>instantaneous force</i> untuk tabung segi-empat dengan keliling yang bervariasi	62
Gambar 5.11 Grafik <i>mean crushing force</i> untuk tabung segi-empat dengan keliling yang bervariasi	63
Gambar 5.12 Hasil simulasi tabung berpenampang segi-enam dengan keliling ..	64
Gambar 5.13 Grafik <i>instantaneous force</i> untuk tabung segi-enam dengan keliling	65
Gambar 5.14 Grafik <i>mean crushing force</i> untuk tabung segi-enam dengan keliling yang bervariasi	66
Gambar 5.15 Perbandingan pola deformasi tabung segi-empat dengan ukuran keliling yang hampir sama besar.....	67
Gambar 5.16 Perbandingan kurva <i>force-displacement</i> hasil numerik dan hasil eksperimen dengan ukuran keliling tabung yang hampir sama besar	68

Gambar 5.17 Perbandingan pola deformasi antara hasil eksperimen dan hasil numerik untuk tabung segi-enam dengan ukuran keliling yang hampir sama besar.	70
Gambar 5.18 Perbandingan kurva <i>load-displacement</i> antara hasil numerik dan hasil eksperimen pada tabung segi-enam dengan ukuran keliling yang hampir sama besar.....	71
Gambar 5.19 Grafik perbandingan harga P_m dengan keliling yang bervariasi menggunakan metode analitik, metode numerik dan metode eksperimen....	73
Gambar 5.20 <i>Fracture</i> pada tabung segi-empat keliling 112.91 mm.....	74
Gambar 5.21. Grafik perbandingan harga P_m dengan keliling yang bervariasi hasil dari metode analitik, metode numerik dan metode eksperimen	76
Gambar 5.22 Kegagalan material pada tabung segi-enam keliling	77
Gambar 5.23 Grafik perbandingan harga P_m pada tabung segi-empat dan segi-enam dengan metode analitik, metode numerik dan metode eksperimen.....	79
Gambar 5.27 Grafik P_m/M_o terhadap t/k pada tabung segi-empat.....	80
Gambar 5.28 Grafik P_m/M_o terhadap tebal/keliling pada tabung segi-enam.....	82
Gambar 5.29 Luas area tumbukan dan luas area penampang	84
Gambar 5.30 Grafik η terhadap ϕ untuk tabung segi-empat	85
Gambar 5.31 Grafik η terhadap ϕ pada tabung segi-enam	86

DAFTAR SIMBOL

$2H$	Tinggi / panjang lipatan
E	Modulus Young
n	<i>strain hardening exponent</i> untuk material ber dinding tipis
M_o	<i>plastic bending moment</i>
P_m	Gaya penghancur rata – rata (<i>mean crushing force</i>)
t	Ketebalan dinding tabung lingkaran
D	Diameter
ρ	Massa jenis
σ_o	<i>Flow stress</i>
σ_u	<i>Ultimate stress</i>
σ_y	<i>Yield stress</i>
ν	<i>Poisson's ratio</i>
V	Kecepatan
η	<i>Structural effectiveness (non-dimensional crushing stress)</i>
φ	<i>Solidity ratio (relative density)</i>

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Satuan yang digunakan dalam tesis ini.....	20
Tabel 3.2 Studi konvergensi.....	22
Tabel 3.3 Properti dari material Aluminium AL 6061 T4	26
Tabel 3.4 Data <i>true stress</i> dan <i>true strain</i> untuk material AL 6061 T4.....	28
Tabel 3.5 Properti dari material pada model <i>impactor</i>	29
Tabel 3.6 Kondisi batas pada <i>impactor</i> dan tabung	29
Tabel 4.1 Konfigurasi geometri tabung spesimen	41
Tabel 4.2 Data Kalibrasi	46
Tabel 4.3 Geometri tabung segi-empat dan kecepatan awal tumbukan pada tabung	48
Tabel 4.4 Geometri tabung segi-enam dan kecepatan awal tumbukan pada tabung	49
Tabel 5.1 Hasil pengukuran geometri penampang tabung segi-empat.....	52
Tabel 5.2 Hasil pengukuran geometri penampang tabung segi-enam.....	54
Tabel 5.3 Data perpindahan total tabung berpenampang segi-empat.....	56
Tabel 5.4 Data perpindahan total tabung berpenampang segi-enam.....	59
Tabel 5.5 Data perpindahan total tabung berpenampang segi-empat.....	62
Tabel 5.6 Data perpindahan total tabung berpenampang segi-enam.....	65
Tabel 5.7 <i>Mean crushing force</i> dari hasil metode analitik, numerik dan eksperimen.....	75
Tabel 5.8 Perbandingan persentase harga P_m antara metode eksperimen terhadap metode numerik dan metode analitik	78

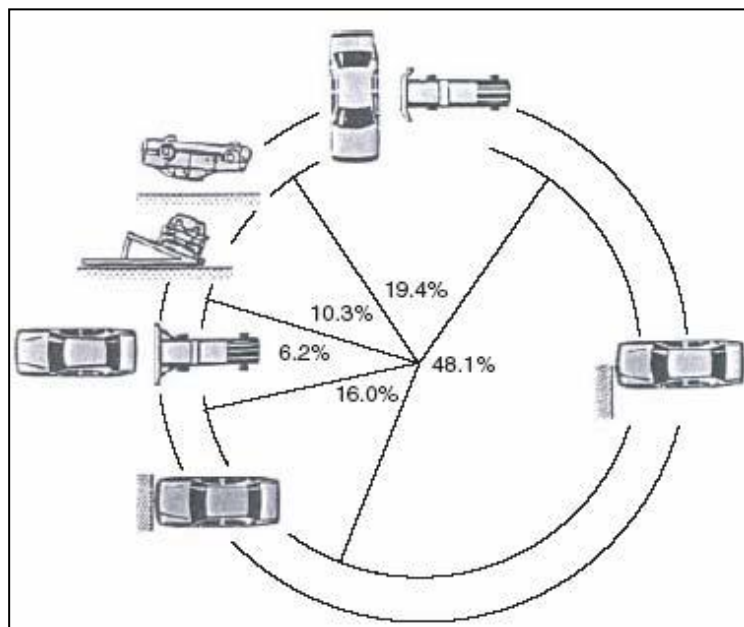
Bab 1 Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Kecelakaan lalu lintas yang menelan korban jiwa untuk pertama kalinya terjadi di Kota New York pada tahun 1889 [1]. Kejadian ini secara tidak langsung merupakan titik tolak lahirnya studi keselamatan dalam bidang otomotif.

Saat ini, keselamatan penumpang telah menjadi salah satu parameter disain yang penting diantara semua kriteria performa yang ada pada kendaraan. Sebelum kendaraan tersebut di produksi dan dipasarkan, kendaraan tersebut harus melalui tahap "*crash test dummy*" yaitu alat uji yang dibuat sama dengan bentuk aslinya (*antromophic device*) baik itu dimensi, proporsi berat kendaraan dan artikulasi dari tubuh manusia yang dilengkapi dengan alat perekam data perilaku dinamis dari alat tersebut yang merupakan simulasi dari kejadian tumbukan pada kendaraan.

Di Indonesia sekitar 32.000 jiwa pertahun meninggal akibat kecelakaan kendaraan bermotor. Sekitar setengah dari jumlah itu menimpa pengendara mobil (sopir atau penumpang) [2].

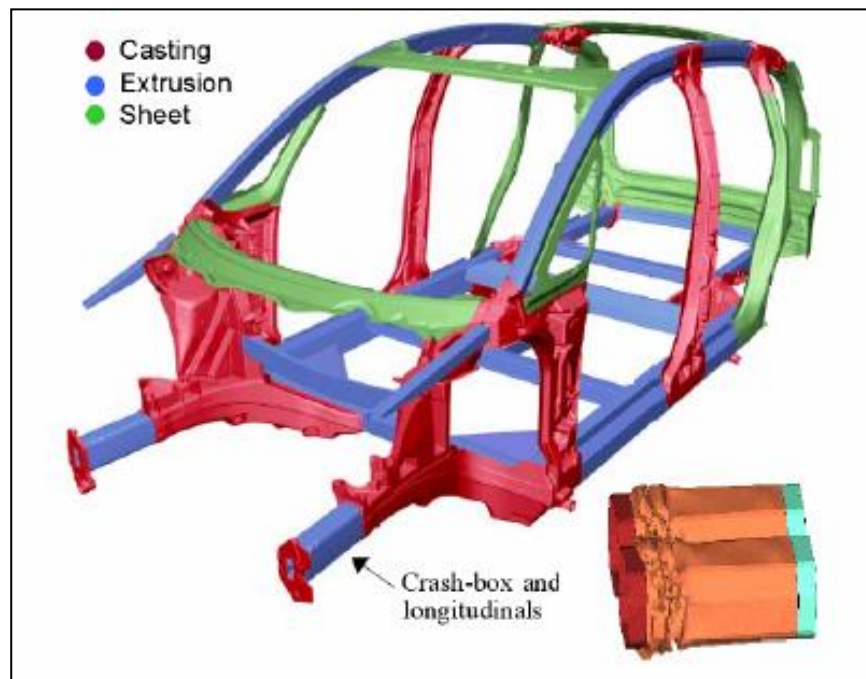


Gambar 1.1 Distribusi kecelakaan mobil di dunia berdasarkan tipe tabrakan [3]

Gambar 1.1 menunjukkan distribusi kecelakaan mobil di dunia berdasarkan tipe tabrakan. Dapat dilihat bahwa sekitar 60 % kecelakaan kendaraan terjadi pada bagian depan kendaraan, jenis tabrakan ini memberikan porsi terbesar pada jumlah kematian.

Untuk mengurangi dampak kecelakaan tersebut maka penelitian mengenai keamanan kendaraan semakin berkembang. Pada mobil, bagian utama yang melindungi kabin penumpang adalah *bumper*. *Bumper* merupakan suatu sistem yang akan menyerap energi tumbukan akibat tabrakan dengan cara berdeformasi plastis, sehingga mengurangi kerusakan pada kabin penumpang serta memberikan perlambatan yang berada pada tingkat aman terhadap tubuh penumpang.

Gambar 1.2 menunjukkan struktur *bumper* kendaraan. Pada sistem bumper kendaraan, terdapat dua mekanisme penting, yakni *frontal bar* dan *crushing box*. *Frontal bar* akan langsung berinteraksi dengan sumber tumbukan yang selanjutnya akan meneruskan gaya tumbuk ke *crushing box*.



Gambar 1.2 Struktur bumper kendaraan [4]

Sistem penyaluran beban tumbukan dari *frontal bar* menuju *Crushing box*, sangat menentukan kinerja *crushing box* itu sendiri. *Crushing box*

merupakan struktur yang didesain untuk menyerap energi tumbukan melalui mekanisme deformasi plastis berupa *wrinkling* dan *buckling* terutama pada kasus tumbukan aksial. Jika *crushing box* tidak berdeformasi plastis, maka energi tumbukan tidak akan diserap, melainkan langsung diteruskan ke daerah kabin penumpang, keselamatan penumpangpun terancam dengan kabin yang mengalami *buckling*. Oleh karena itu, diharapkan seluruh energi tumbukan dapat diserap semuanya menjadi kerusakan plastis pada struktur *crushing box*.

Di Amerika berbagai jenis dan bentuk dari *crushing box* telah dipelajari, seperti :

1. US Patent No. US 7,213,867 dated on 8th May 2007: Shock absorbing device for vehicle and shock absorbing structure for vehicle [5].
2. US Patent No. US 7,201,414 dated on 10th April 2007: Shock absorbing structure for a vehicle [6].
3. US Patent No. US 7,201,413 dated on 10th April 2007: *Crash Box* [7].

Selain itu studi tentang fenomena penyerapan energi dan modus deformasi akibat beban tumbuk telah dilakukan sebelumnya dalam beberapa tahun terakhir antara lain :

- Melakukan studi tentang pengaruh bentuk penampang terhadap penyerapan energi pada tabung berdinding tipis dengan material baja ringan ST 37 yang mengalami beban tumbukan kecepatan rendah arah aksial dengan menggunakan metode analitik, numerik dan eksperimen [8].
- Melakukan studi perilaku kolom sandwich berdinding ganda yang mengalami beban tumbukan kecepatan rendah pada arah aksial dengan menggunakan analisis numerik serta mengkaji efisiensi berat dari berbagai konfigurasi sandwich [9].
- Melakukan kaji parametrik kasus tumbukan kecepatan rendah pada tabung berpenampang lingkaran menggunakan material mildsteel RSt.37 dengan metode elemen hingga [10]

- Melakukan kaji parametrik kasus tumbukan berkecepatan rendah pada tabung berpenampang lingkaran, segi-enam dan bujur sangkar menggunakan material AL 6060 T4 dengan metode elemen hingga [11].

Pada studi [11], jenis material yang digunakan pada studi tersebut adalah aluminium. Jika sebagian besar struktur kendaraan menggunakan material aluminium, maka dapat menghemat berat sebesar 25 % dibandingkan menggunakan baja konvensional, sehingga bahan bakar yang dikonsumsi kendaraan dan karbon dioksida yang dihasilkan dari gas buang kendaraan juga akan berkurang. Selain itu material tersebut memiliki ketahanan korosi yang baik [12]. Studi [11] terbatas hanya pada material AL 6060 T4 serta pengujian yang dilakukan hanya menggunakan metode elemen hingga. Oleh karena itu, pada tesis ini studi tentang fenomena penyerapan energi dan modus deformasi tabung dari material AL 6061 T4 yang mengalami beban tumbuk aksial menggunakan metode analitik, numerik dan eksperimen dilakukan dengan penampang tabung berbentuk segi-empat dan segi-enam.

1.2 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai pada tesis ini adalah :

1. Melakukan eksperimen tumbuk kecepatan rendah pada tabung ber dinding tipis dengan penampang segi-empat dan segi-enam yang mempunyai beberapa keliling yang berbeda
2. Mengamati modus lipatan tabung akibat beban tumbuk
3. Mempelajari pengaruh rasio tebal/keliling terhadap *mean crushing force* dan *normalized mean crushing force*
4. Membandingkan harga *mean crushing force*, *normalized mean crushing force*, dan *structural effectiveness* tabung hasil analitik, hasil numerik dengan menggunakan MEH non-linier dan hasil eksperimen.
5. Membandingkan harga *mean crushing force*, *normalized mean crushing force*, dan *structural effectiveness* antara tabung segi-empat dan tabung segi-enam.

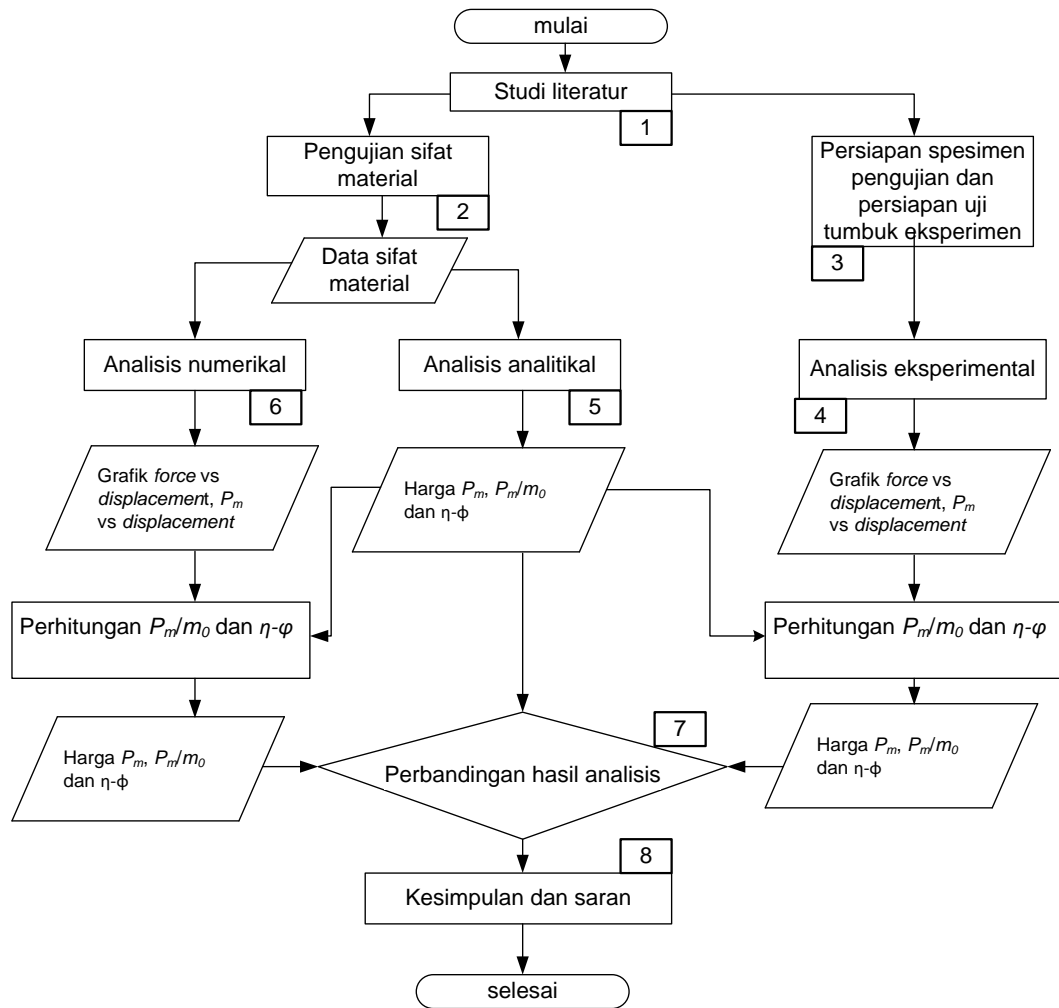
1.3 Batasan Masalah

Tesis ini dilakukan dalam lingkup batasan masalah sebagai berikut :

1. Pada tesis ini dilakukan eksperimen tumbuk kecepatan rendah pada tabung berdinding tipis dengan penampang segi-empat dan segi-enam.
2. Material yang digunakan adalah AL 6061 T4.
3. Keliling tabung yang digunakan dalam eksperimen mulai dari 112.91 mm sampai dengan 190.70 mm untuk tabung segi-empat, untuk tabung segi-enam keliling tabung dimulai dari 108.60 mm sampai dengan 181.42 mm. Sedangkan keliling tabung yang digunakan untuk model tabung numerik dan analitik pada kedua penampang adalah sama, mulai dari 112 mm sampai dengan 184 mm.
4. Material yang digunakan adalah AL 6061 T4.
5. Berat penumbuk atau impaktor sebesar 40 Kg.
6. Kecepatan untuk setiap kali tumbukan dalam eksperimen dan numerik bervariasi mulai dari 4.86 m/s sampai dengan 5.23 m/s.
7. Studi tentang fenomena penyerapan energi dan modus deformasi akibat beban tumbuk hanya dibatasi untuk tabung dengan material AL 6061 T4 yang memiliki bagian las-lasan pada salah satu sisinya.

1.4 Metodologi penelitian

1. Studi literatur
Untuk mengetahui dan memahami perilaku dinamika struktur berdinding tipis ketika diberi beban tumbukan pada tabung.
2. Pengujian sifat material
Hasil data pengujian sifat material tabung dari uji tarik dan *microhardness vicker test* digunakan sebagai parameter input dalam analitik dan numerik menggunakan MEH non-linier.
3. Persiapan spesimen pengujian dan persiapan uji tumbuk eksperimen
Sebelum memulai eksperimen uji tumbuk hal-hal yang dilakukan terlebih dahulu adalah pembuatan tabung spesimen dan kalibrasi *load cell* serta kalibrasi instrumen.



Gambar 1.3 Flow chart langkah pengerjaan tesis

4. Analisis eksperimental

Eksperimen tumbuk kecepatan rendah dilakukan pada tabung segi-empat dan segi-enam dengan keliling yang bervariasi untuk validasi dari hasil numerik seperti untuk mengetahui rasio t/k terhadap harga P_m (*mean crushing force*) dan P_m/m_0 (*normalized mean crushing force*).

5. Analisis numerikal

Analisis numerikal dilakukan dengan menggunakan MEH non-linier. Parameter input yang digunakan pada analisis ini seperti data material, data kecepatan awal tumbukan, data berat penumbuk, data uji tarik, data *microhardness vicker test* didapat dari pengujian eksperimen. Hal ini dilakukan untuk membandingkan hasil numerik dengan hasil eksperimen.

6. Analisis analitikal
Perhitungan analitik dilakukan sebagai pembandingan hasil metode numerik menggunakan MEH non-linier dan hasil eksperimen.
7. Perbandingan hasil analisis
Perbandingan hasil analitik, numerik dan eksperimen dilakukan untuk mengetahui perbedaan harga dari P_m (*mean crushing force*), P_m/m_0 (*normalized mean crushing force*) dan $\eta-\varphi$ baik secara kualitatif maupun kuantitatif.
8. Kesimpulan dan saran
Hasil analitik, numerik dan eksperimen memberikan beberapa kesimpulan yang dinyatakan dalam persentase dari harga P_m (*mean crushing force*), P_m/m_0 (*normalized mean crushing force*) dan $\eta-\varphi$, sedangkan kendala-kendala yang dihadapi dan beberapa pendapat yang diperlukan untuk penelitian selanjutnya dimasukkan kedalam saran.

1.5 Sistematika Penulisan

Tesis ini dibagi menjadi 7 Bab, sistematika penulisan sebagai berikut :
 BAB 1 Pendahuluan - Berisi mengenai latar belakang dari kasus yang dikaji, tujuan, deskripsi masalah, strategi pengerjaan dan sistematika penulisan
 BAB 2 Dasar Teori – Berisi tinjauan literatur mengenai tumbukan dan teori-teori tentang proses pelipatan.

BAB 3 Pemodelan Numerik – Bab ini menjelaskan pemodelan yang dilakukan dimulai dari sistem satuan yang digunakan, uji konvergensi, sifat material bahan, kondisi batas dan pembebanan, sampai pemodelan elemen hingga dari kedua model tabung.

BAB 4 Eksperimen tumbuk kecepatan rendah dan pengolahan data – Bab ini menjelaskan setiap komponen yang terdapat pada alat uji tumbuk dan penjelasan mengenai alat akuisisi yang berguna untuk pengambilan data dari uji eksperimen. Selain itu juga dilakukan persiapan eksperimen, seperti pembuatan tabung, uji tarik dan pengujian *Microhardness vicker* pada daerah sambungan yang terdapat disalah satu bagian sisi tabung spesimen.

BAB 5 Analisis – Bab ini fokus pada hasil analisis tabung segi-empat dan tabung segi-enam dengan menggunakan metode analitik, numerik dan eksperimen.

BAB 7 Kesimpulan dan Saran – Bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil analisis dan saran untuk penelitian selanjutnya.

Bab 2 Dasar Teori

Crashworthiness sering digunakan dalam istilah industri otomotif. Biasanya sebelum kendaraan diproduksi dan dipasarkan, kendaraan terlebih dahulu di uji keamanannya terhadap efek tabrakan atau tumbukan yang sering disebut dengan pengujian *crashworthiness*. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat keamanan pengemudi saat terjadi tabrakan atau tumbukan. Peristiwa tumbukan ini merupakan fenomena dinamik karena semua parameter (gaya dan perpindahan) yang terjadi pada peristiwa ini merupakan fungsi dari waktu. Tumbukan ini biasanya terjadi dalam waktu yang relatif singkat. Tumbukan tersebut menghasilkan gaya yang akan berubah menjadi gelombang deformasi yang merambat sepanjang benda yang disebut dengan *stress wave*. Pada tabung yang mengalami tumbukan arah aksial, gelombang deformasi ini dikenal sebagai progressive buckling. Fenomena ini disebabkan karena adanya perubahan energi tumbukan menjadi lipatan-lipatan yang berurutan dan berulang pada tabung.

2.1 Crashworthiness

Crashworthiness tidak dapat dipisahkan dalam kejadian tumbukan. *Crashworthiness* adalah kemampuan struktur untuk melindungi penumpang saat terjadi benturan atau tumbukan, oleh karena itu *crashworthiness* digunakan untuk menyelidiki keamanan kendaraan sebelum di produksi dan dipasarkan. *Crashworthiness* diketahui dengan membuat model menggunakan media komputer dengan perangkat lunak yakni MSC-Dytran, MADYMO, ABAGUS, PAM-CRASH, CRASH CADTM, PAM-SAFETM, UNIGRAPHICS, dan LS-DYNA , atau dapat juga dengan pengujian eksperimen menggunakan metode "crash test dummy" . Kedua cara ini telah dilakukan oleh Automotor Und Sport [13] dan Consumentengids [13].

Prinsip utama *crashworthiness* dalam bidang otomotif adalah untuk menjaga agar ruangan cukup aman bagi pengguna kendaraan (penumpang dan operator/sopir) ketika terjadi tabrakan dan membatasi gaya serta perlambatan yang diterima oleh pengguna kendaraan pada tingkat yang tidak

membahayakan . Ada dua kriteria yang harus dipenuhi oleh mobil untuk memenuhi *crashworthiness* [9] :

1. Kompartemen penumpang tidak berubah bentuk dan tidak ada instruksi benda luar yang bisa membahayakan penumpang.
2. Tersedianya jarak deformasi didepan kompartemen penumpang sehingga deselerasi berlebihan pada penumpang dapat dicegah.

Pada mobil untuk melindungi bagian kompartemen penumpang karena tabrakan dibagian depan dipasang sistem *bumper*. Sistem *bumper* ini akan menyerap energi tumbukan akibat tabrakan dengan cara berdeformasi. Dengan berdeformasi, sistem *bumper* dapat mengurangi kerusakan pada kompartemen penumpang serta memberikan perlambatan yang berada pada tingkat aman terhadap tubuh penumpang. Sistem *bumper* terdiri dari *frontal bar* dan batang *longitudinal*. Ketika tabrakan didepan terjadi, *frontal bar* menyalurkan energi tumbukan pada batang *longitudinal*. Energi tersebut kemudian diserap oleh batang *longitudinal*, dengan cara deformasi plastis berupa lipatan lipatan berulang pada batang *longitudinal*.

2.2 Tumbukan

Pengetahuan mengenai fenomena tumbukan atau benturan (*impact*) pada berbagai material memiliki manfaat yang sangat luas dalam berbagai bidang rekayasa. Dewasa ini, seiring dengan performa yang semakin baik dan fungsi yang semakin beragam, kecepatan kerja alat-alat mekanik juga meningkat tajam. Hal ini mau tidak mau meningkatkan resiko terjadinya benturan. Oleh karena itu komponen alat-alat mekanik tersebut harus didesain sedemikian rupa agar tetap berfungsi baik meskipun terjadi benturan dengan benda lain.

Tumbukan dapat didefinisikan sebagai perubahan momentum yang tiba-tiba pada saat dua benda saling bersentuhan, tanpa perubahan posisi yang berarti. Subyek penelitian mengenai tumbukan (*impact*) telah menarik perhatian bermacam ilmuwan dan engineering dari berbagai macam disiplin ilmu dari *astrophysics* hingga *robotics*. Persamaan tujuan yang ingin mereka raih adalah untuk dapat mengembangkan teori yang dapat memprediksi kelakuan struktur yang mengalami tumbukan.

Berdasarkan Salah Faik dan Witteman [14] ada empat aspek penting dalam masalah tumbukan yaitu :

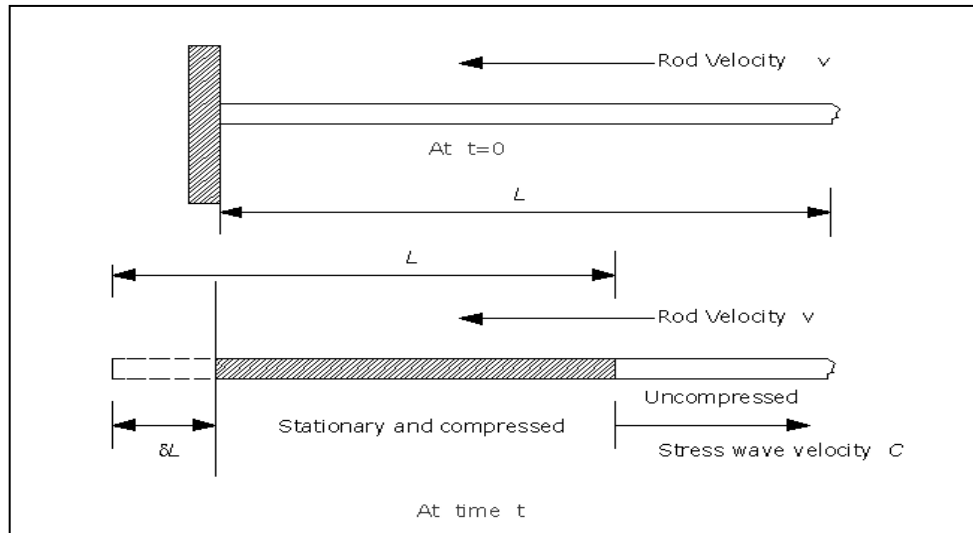
1. Mekanika klasik
2. Propagasi gelombang elastik
3. Mekanika kontak
4. Deformasi plastis

2.2.1 Mekanika klasik

Mekanika klasik adalah bagian dari ilmu fisika mengenai gaya yang bekerja pada benda. Sering dinamakan "mekanika Newton" dari Newton dan hukum gerak Newton. Mekanika klasik dibagi menjadi sub bagian lagi, yaitu statika (mempelajari benda diam), kinematika (mempelajari benda bergerak), dan dinamika (mempelajari benda yang terpengaruh gaya. Hukum *impuls-momentum* merupakan inti dari pendekatan ini. Goldsmith, pada karya klasiknya memberikan bab yang membahas aplikasi metode ini pada beberapa masalah. Brach menggunakan pendekatan ini pada model-model yang praktis. Matematika aljabar yang digunakan cukup mudah dan dimengerti oleh semua ahli teknik. Energi yang hilang telah diperhitungkan dengan menggunakan definisi koefisien restitusi. Akurasi dari koefisien ini sangat penting untuk mendapatkan hasil yang benar. Kerugian pendekatan ini adalah tidak mampu memprediksi gaya kontak antara kedua benda atau tegangan diantara keduanya.

2.2.2 Propagasi gelombang elastik

Tumbukan disertai dengan gelombang *stress* yang merambat pada benda yang mengalami tumbukan dan menjauhi daerah tempat terjadinya tumbukan. Jika energi yang berubah menjadi getaran adalah bagian yang terpenting dalam energi total maka pendekatan mekanika klasik tidak dapat digunakan pada masalah tumbukan ini. Pendekatan ini digunakan pada tumbukan pada batang arah longitudinal yang ditunjukkan pada gambar 2.1 tumbukan suatu benda penumbuk pada batang dan untuk mengetahui efek viskoelastis pada perilaku tumbukan.



Gambar 2.1 Propagasi *elastic wave*

2.2.3 Mekanika Kontak

Ilmu mekanika kontak adalah ilmu yang membahas mekanisme kontak antara dua buah benda yang saling bersinggungan. Kontak tersebut bisa berupa garis, titik dan bidang. Tegangan (*Stress*) pada bidang kontak akibat tumbukan antara dua benda merupakan bagian lain dari studi mengenai tumbukan yang menarik untuk dipelajari. Mekanika kontak konvensional dengan basis kontak statis sudah diperluas untuk memberikan solusi pendekatan pada masalah tumbukan. Pada permukaan bola, teori Hertz digunakan untuk mendapatkan hubungan antara *force* dan deformasi yang dibutuhkan untuk menghitung lamanya tumbukan dan jarak maksimum akibat tumbukan. Pendekatan ini telah diperluas pada kasus-kasus yang mengandung deformasi plastis. Persamaan *force* deformasi sering diperluas dengan memberikan efek redaman untuk merepresentasikan disipasi pada daerah kontak, sehingga daerah kontak dapat dimodelkan secara lebih efektif sebagai sistem *spring-damper*.

2.2.4 Deformasi Plastis

Ketika regangan plastis melebihi skala deformasi yang ada, model propagasi gelombang elastis tidak dapat lagi digunakan untuk menganalisa tumbukan. Hal ini merupakan domain dari tumbukan berkecepatan tinggi yang sering diasosiasikan dengan ledakan dan proyektil. Goldsmith memberikan studi mengenai subyek ini dengan menggunakan dua pendekatan yaitu teori

hidrodinamik dari perilaku benda solid dan teori propagasi gelombang plastis. Pada teori hidrodinamik, deformasi permanen diperhitungkan sebagai hasil dari perubahan kerapatan benda. Persamaan keadaan untuk material yang menghubungkan tekanan dengan perubahan kerapatan dan temperatur atau entropi digunakan bersama dengan hukum konservasi momentum, energi dan massa. Pada teori propagasi regangan plastis, material dipertimbangkan sebagai inkompresibel pada domain plastis.

2.3 Karakteristik tumbukan pada elemen elastoplastic

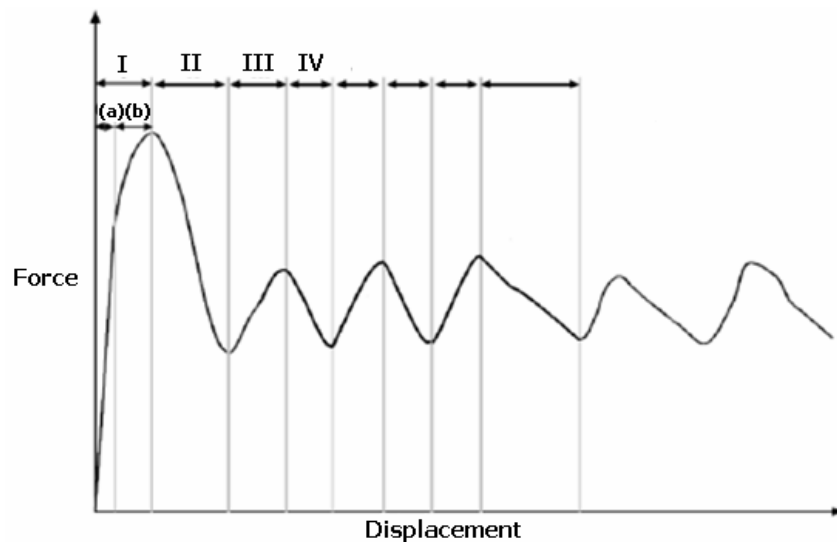
Sifat *inelastic* dari tabung ketika mengalami tumbukan oleh massa yang bergerak akan dijelaskan secara singkat pada sub-bab ini. Gambar 2.2 Menunjukkan kurva *force-displacement /instantaneous force* secara umum untuk tabung yang ditumbuk oleh massa yang bergerak. Dapat dilihat bahwa setelah terjadi tumbukan pertama, tabung mengalami deformasi elastis seperti pada area (a), kombinasi dari area (a) dan area (b) disebut deformasi elastoplastis. Setelah itu tabung mengalami fase deformasi plastis, ketika *force* yang bekerja mulai berkurang akan tetapi *displacement* yang terjadi tetap bertambah (area (II) pada gambar 2.2). Kejadian ini dapat diamati saat *failure* pertama (*folding*) dari tabung terjadi. Pada tes pembebanan secara axial, tabung akan terdeformasi menjadi beberapa *folding*. Setelah *folding* pertama terjadi, *folding* selanjutnya mulai terbentuk, lalu *folding* ketiga, dan seterusnya. Pada saat *folding* kedua, deformasi elastoplastis (area (III) pada gambar 2.2) dan kegagalan plastis (area (IV) pada gambar 2.2) terjadi. Deformasi ini akan terjadi berulang ulang hingga massa yang bergerak telah mencapai perpindahan maksimalnya, kecuali jika terjadi modus *column buckling* yang dramatis selama tes tumbukan.

Gaya puncak atau *peak force* pada kurva *instantaneous force* memperlihatkan formasi lipatan yang terjadi pada tabung, dan jarak antara dua buah *peak force* menunjukkan panjang lipatan pada daerah plastis. *Peak force* pertama yang terjadi memperlihatkan inisiasi *buckling* lokal, yang ditandai dengan besarnya gaya yang dibutuhkan untuk terjadinya lipatan pertama.

Besar *mean crushing force* (P_m) didefinisikan sebagai berikut :

$$P_m = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} P(\delta) d\delta \quad (5.1)$$

Dimana $P(\delta)$ adalah yang diperoleh dari hasil uji tumbuk tabung dengan massa yang bergerak. P_m adalah harga rata-rata dari *instantaneous force*. Pada *mean crushing force*, setelah terjadi lipatan pertama, *mean crushing force* akan beresilasi menuju suatu harga konvergen. Nilai prediksi P_m ditentukan dengan menjumlahkan seluruh yang bekerja hingga akhir *displacement* dan membaginya dengan total *displacement*.



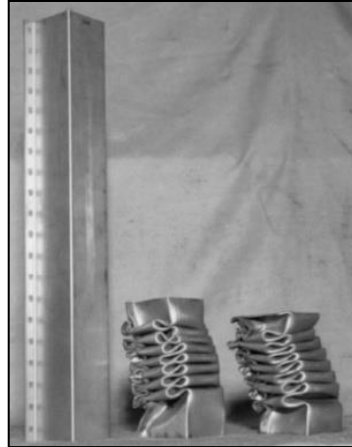
Gambar 2.2 Kurva *force-displacement* untuk tabung yang ditumbuk dengan massa yang bergerak

Ketahanan tumbukan pada tabung berdinding tipis

Karakteristik deformasi plastis dari tabung berdinding tipis berperan sangat vital pada beberapa sistem penyerapan energi. *Progressive folding* dari sebuah struktur, dihasilkan oleh beban aksial, ditunjukkan oleh gambar 2.3.

Parameter karakteristik untuk kegagalan aksial seperti *mean crushing force* dan panjang *folding wave*, merupakan hal yang dibutuhkan untuk mendesain suatu sistem penyerapan energi atau untuk referensi dari *crashworthiness*. Pada tahap awal desain, parameter ini dapat memfasilitasi untuk mendapatkan dimensi yang tepat dan untuk membantu mengurangi biaya dari eksperimen prototipe.

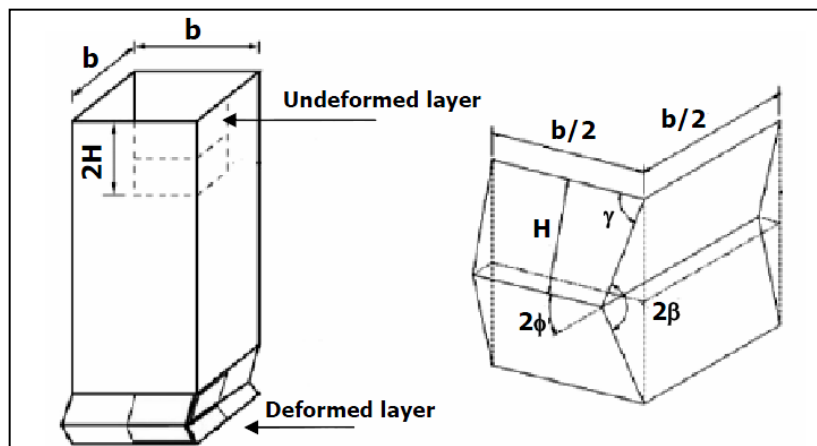
Sub bab ini menjelaskan mengenai teori analisis dari struktur tabung ber dinding tipis termasuk perilaku penyerapan energi dari tabung berpenampang segi-empat dan segi-enam serta ketahanan tumbukan *quasi-static* dan dinamik dari tabung berpenampang segi-empat.



Gambar 2.3 Deformasi baja setelah mengalami pembebanan quasi-static [15]

2.3.1 Tabung Segi-empat

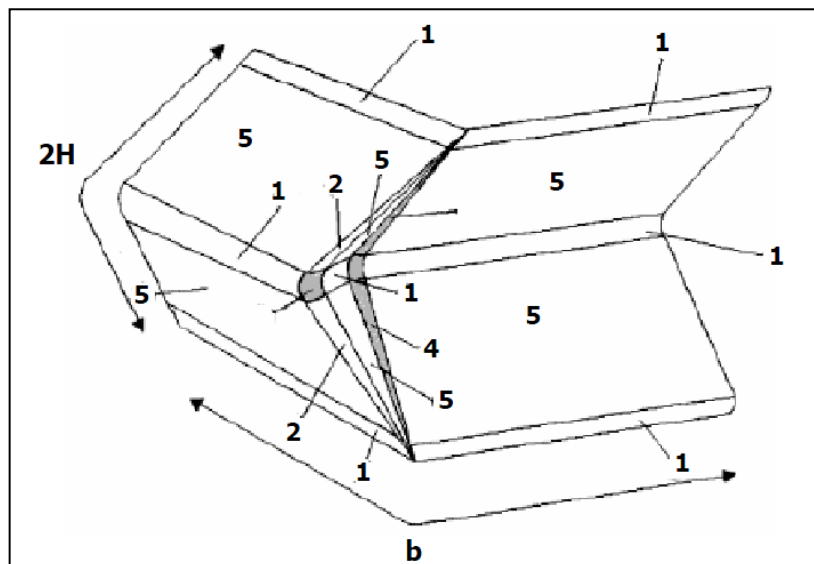
Tabung berpenampang bujursangkar dengan luas penampang $b \times b$ dan ketebalan t mengalami tumbukan aksial seperti pada gambar 2.4



Gambar 2.4 Box column (a) Pola deformasi; (b) superfolding elemen [16]

Disipasi energi dapat dihitung berdasarkan deformasi pada elemen *folding* seperti pada gambar 2.4(b) dan gambar 2.5. Material yang digunakan merupakan material isotropik dengan sifat yang tidak tergantung waktu dan dianggap sebagai

benda pejal, plastik sempurna, karena regangan yang terjadi pada daerah plastis lebih besar dibandingkan dengan regangan elastis maksimum. Panjang dari lipatan gelombang pada elemen, $2H$, diasumsikan selalu konstan selama proses tumbukan berlangsung. Elemen *folding* pada gambar 2.5 Terdiri dari 18 *shell elemen*; *rigid elements* (konotasi no.5), elemen yang mengalami deformasi *inextensional* (konotasi no.1 dan no.2), *quasi-inextensional* elemen (konotasi no.4). Pada umumnya, deformasi plastis terjadi pada sebagian kecil dari tabung dan plastis energi terdisipasi melalui deformasi pada sambungan dan zona *membrane action*. Persamaan *mean crushing force* dan panjang setengah *folding* berdasarkan referensi [16].



Gambar 2.5 Komposisi dari basic superfolding elemen [16]

Elemen *folding* mempunyai karakteristik dengan elemen setengah *folding* H , yang didapat dari kondisi minimum dari *mean crushing force*.

$$\frac{H}{t} = 0.99 \left(\frac{b}{t} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.1)$$

Dinamik *mean crushing force/plastic bending moment* dituliskan sebagai berikut

$$\frac{\bar{P}_m^d}{M_0} = 51.27 \left[1 + \left(\frac{0.33V}{bD} \right)^{1/p} \right] \left(\frac{b}{t} \right)^{1/3} \quad (2.2)$$

Dengan M_0 merupakan *fully plastic bending moment* dan σ_0 merupakan flow stress dari material.

$$M_0 = \frac{1}{4} \sigma_0 t^2 \quad (2.3)$$

$$\sigma_0 = \sqrt[3]{\frac{2\sigma_y \sigma_u^2}{(n+1)^2(n+2)}} \quad (2.4)$$

Dimana σ_y dan σ_u merupakan yield dan ultimate strength dari material, dan n adalah eksponen strain hardening dari material berinding tipis.

Variabel D dan p dalam persamaan merupakan koefisien dari persamaan empiris Cowper-Simond Uniaxial. Persamaan ini digunakan secara luas dalam mencari efek material strain rate dari sebuah struktur

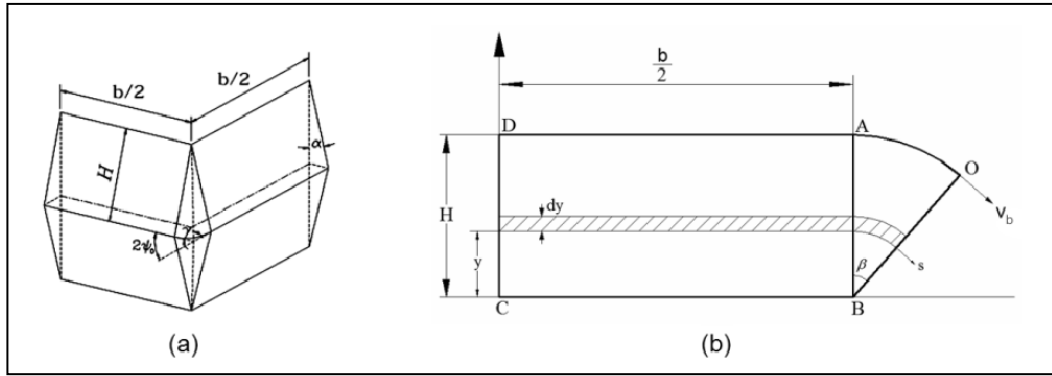
$$\frac{\sigma_y^d}{\sigma_u} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/p} \quad (2.5)$$

Harga D dan p merupakan suatu koefisien, pada kasus studi ini digunakan harga D dan p sebesar 6500 s^{-1} dan 4 .

2.3.2 Tabung Segi-Enam

Solusi untuk menghitung energi disipasi pada deformasi modus basic collapse elemen extensional yang ditunjukkan pada gambar 2.7. Pertama kali diperkenalkan oleh Abramowicz dan Norman Jones [17]. Persamaan tabung segi-enam telah diturunkan berdasarkan tabung lingkaran dengan multi corner oleh Anh [8] sehingga besar setengah elemen *folding* H dapat ditulis sebagai berikut :

$$H = 1.77 \left(\frac{tR}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ atau } \frac{H}{R} = 1.77 \left(\frac{2}{tR} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$



Gambar 2.6 (a) Elemen dasar tipe extensional collapse (b) Perubahan bagian dari elemen dasar pada gambar(a) [18]

Dapat dilihat bahwa persamaan di atas sama dengan persamaan setengah elemen *folding* milik tabung lingkaran. Hal ini dikarenakan besar harga H untuk tabung segi-enam diturunkan dari tabung lingkaran.

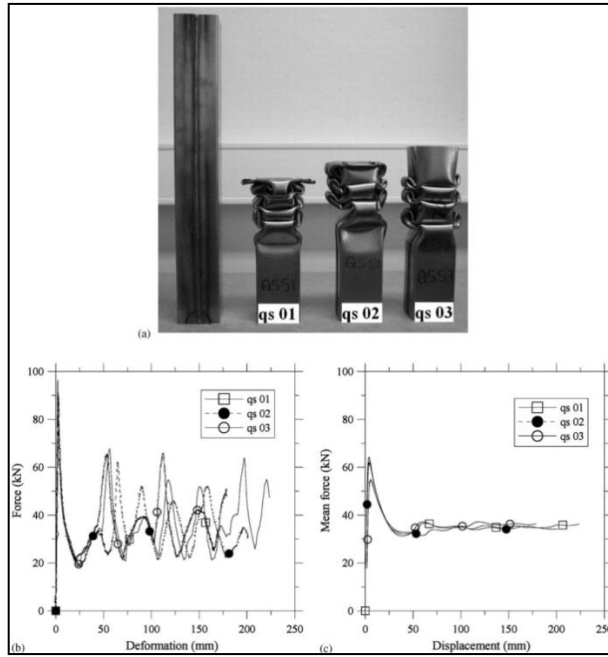
Dan *mean crushing force* dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{\bar{P}_m^d}{M_0} = \frac{12}{0.81} \left[\frac{2H\pi}{6t} + \frac{\pi b}{2H} + \frac{\pi}{3} \right] \left[1 + \left\{ \frac{V\pi}{9.72D(b + \beta H)} \right\}^{\frac{1}{p}} \right] \quad (2.9)$$

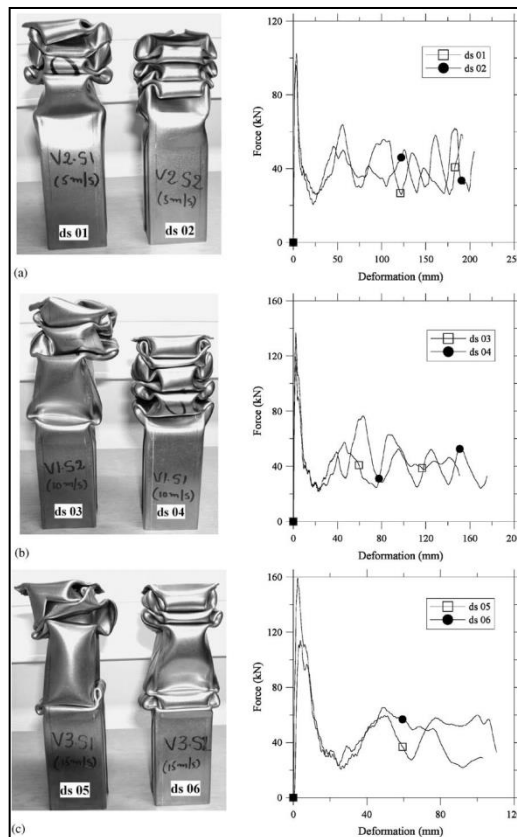
Dengan harga M_0 sama dengan persamaan (2.3)

2.4 Efek Inersia

Ketika suatu struktur diberi beban secara *quasi-static* atau beban diberikan secara perlahan-lahan efek inersia tidak memberikan pengaruh pada respon struktur. Pada kasus tabung berdinding tipis yang dibebani secara aksial *quasi-static*, beban diberikan secara perlahan-lahan sehingga efek inersia pada arah aksial dan lateral dari tabung tidak memberikan kontribusi yang signifikan pada respon tabung. Namun, jika tabung yang sama diberikan beban dinamik maka inersia tabung akan mempengaruhi respon dari tabung tersebut. Bentuk deformasi akhir tabung untuk pembebanan *quasi-static* akan berbeda dengan deformasi akhir tabung untuk pembebanan dinamik. Kondisi pembebanan dinamik memberikan peak load atau reaksi gaya dari tabung akibat pembebanan, yang lebih tinggi dibanding dengan pembebanan *quasi-static*. Gambar 2.8 dan gambar 2.9 menunjukkan hasil akhir deformasi dari pembebanan *quasi-static* dan pembebanan dinamik berdasarkan eksperimen oleh V.Tarigopula [15].



Gambar 2.7 Hasil tes quasi-static. (a) Tabung segi-empat yang mengalami deformasi, (b) kurva *force-deformation*, (c) *mean crushing force* dari tabung [15]



Gambar 2.8 Hasil akhir tes pembebanan dinamik pada tabung segi-empat. (a) 5 m/s; (b) 10 m/s; (c) 15 m/s [15]

Bab 3 Pemodelan numerik

Dalam tesis ini, metoda elemen hingga non-linier yang digunakan untuk mensimulasikan hasil numerik tumbukan aksial pada tabung berdinding tipis adalah software LS-DYNA 970-Double Precision.

3.1 Geometri Struktur

Tabel 3.1 dibawah ini menyajikan satuan yang digunakan dalam pemodelan LS-DYNA dan dalam perhitungan analitik.

Tabel 3.1 Satuan yang digunakan dalam tesis ini

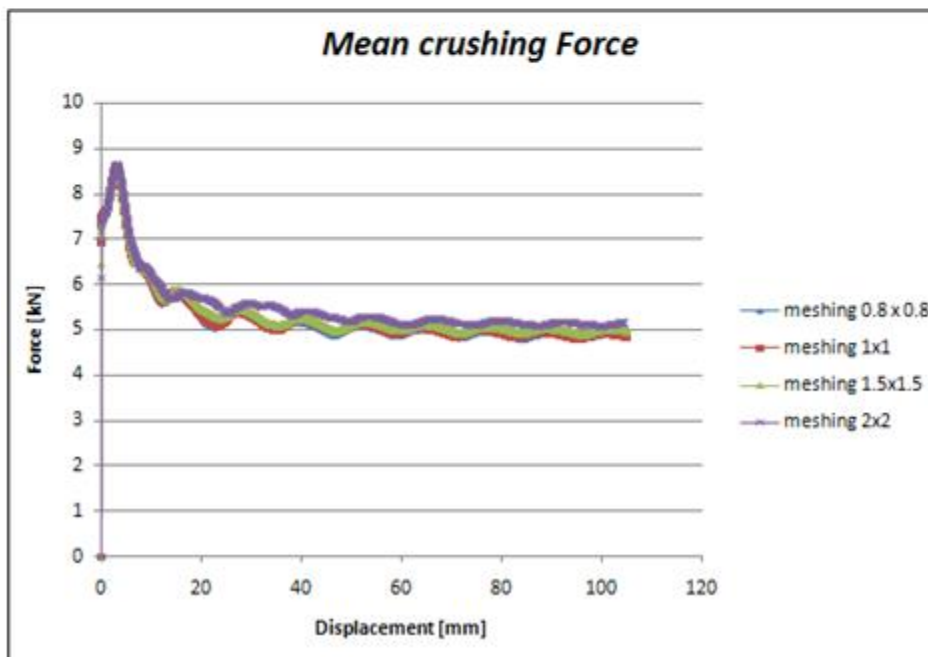
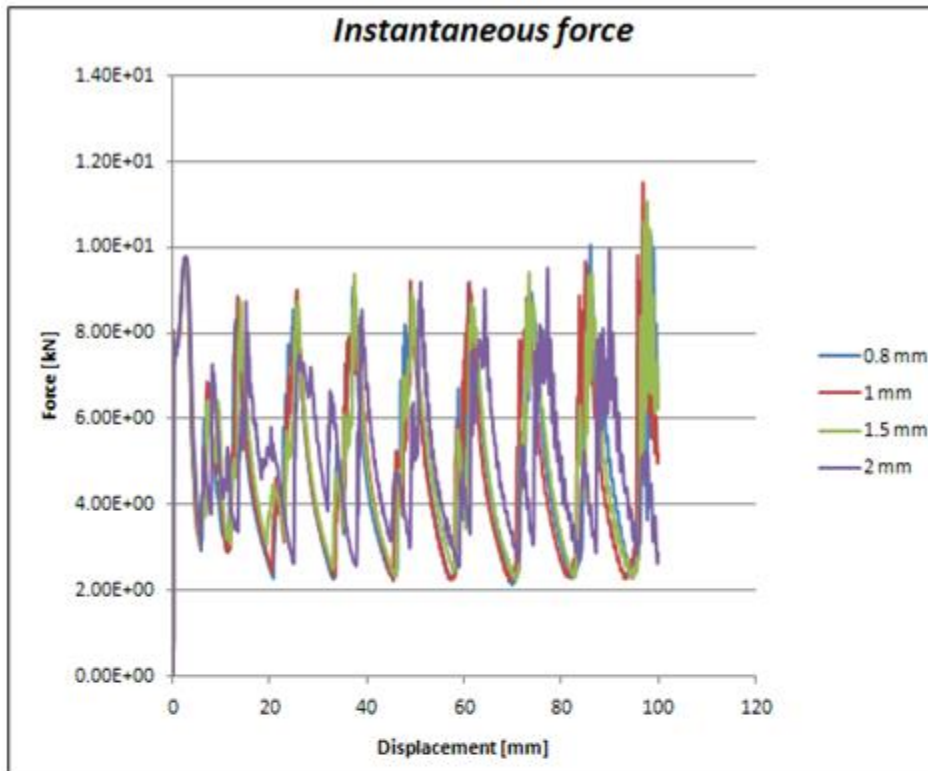
Parameter	Satuan
Panjang	mm
Massa	Kg
Waktu	ms
P (massa jenis)	Kg/mm ³
F (force)	kN
E (Young's Modulus)	GPa
σ (Tegangan)	GPa
Energi	Joule
V (kecepatan)	Mm/ms

3.2 Ukuran elemen

Dengan studi konvergensi pada bagian ini, ditemukan bahwa ukuran elemen shell quadrilateral pada pemodelan sebesar $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ sesuai untuk tabung prisma berdinding tipis yang mengalami tumbukan aksial.

3.2.1 Studi konvergensi

Studi konvergensi dilakukan pada tabung prisma oktagonal dengan $L = 150\text{ mm}$, $b = 14\text{ mm}$ dan $t = 0.8\text{ mm}$. Ukuran dari elemen shell quadrilateral yang dibandingkan untuk studi konvergensi adalah $2 \times 2\text{ (mm)}$, $1.5 \times 1.5\text{ (mm)}$, $1 \times 1\text{ (mm)}$ dan $0.8 \times 0.8\text{ (mm)}$. Perilaku tabung oktagonal ditunjukkan pada gambar 3.1. Setelah itu, perbandingan kurva konvergensi untuk setiap ukuran



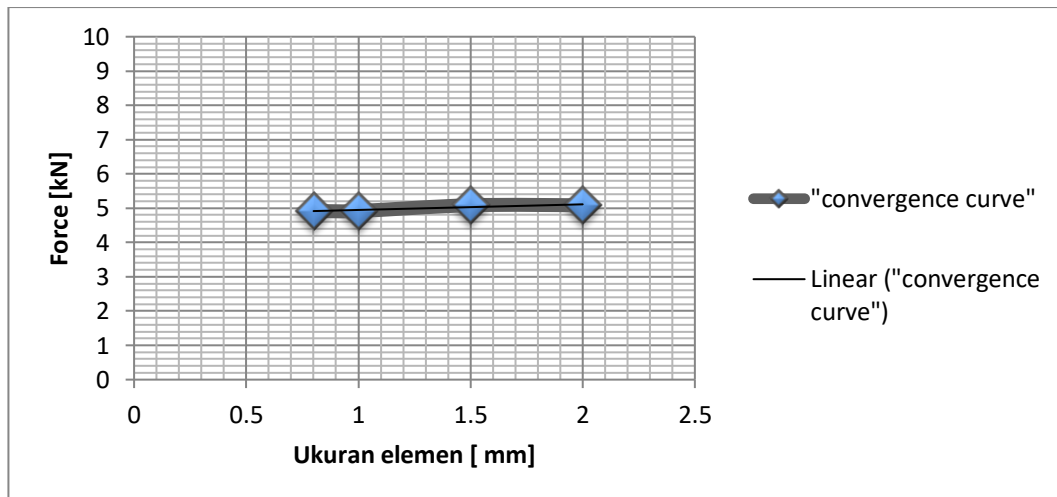
Gambar 3.1 efek dari ukuran elemen terhadap perilaku tabung oktagon

elemen digambarkan berdasarkan harga *mean crushing force* pada Tabel 3.2. Pada tabel diketahui bahwa nilai *mean crushing force* dari tabung oktagon dengan ukuran 1 x 1 (mm) dan 0.8 x 0.8 (mm) mempunyai perbedaan harga yang tidak

signifikan, hanya sekitar 0.04 %. Oleh karena itu dengan tujuan untuk menghemat waktu proses komputasi dan tanpa kehilangan hasil yang signifikan maka pada pemodelan ini dipilih elemen 1 x 1 (mm) untuk setiap tabung uji.

Tabel 3.2 Studi konvergensi

Ukuran elemen	<i>Mean crushing force</i> [kN]
2 x 2 (mm)	5.085
1.5 x 1.5 (mm)	5.005
1 x 1 (mm)	4.919
0.8 x 0.8 (mm)	4.916



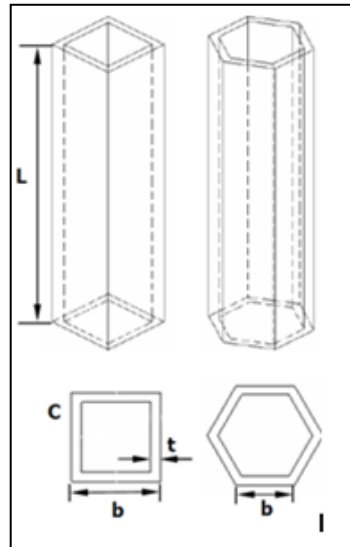
Gambar 3.2 Studi konvergensi

3.3 Dimensi penampang tabung berdinding tipis

Dalam studi kasus parametrik terhadap tabung berdinding tipis, dilakukan 14 kali simulasi tumbukan aksial dengan keliling yang berbeda pada tabung berpenampang segi-empat dan segi-enam. Simulasi dilakukan dengan tujuan untuk mempelajari pengaruh rasio tebal/ keliling terhadap harga *mean crushing force*. Sedangkan pengujian eksperimen dilakukan sebagai validasi dari hasil simulasi. Konfigurasi geometri tabung yang akan dibuat model ditunjukkan pada Tabel 4.1 .

Gambar 3.3 menunjukkan geometri dari tabung spesimen yang dianalisis. Dengan L adalah tinggi , C adalah keliling , b adalah sisi (untuk penampang segi-

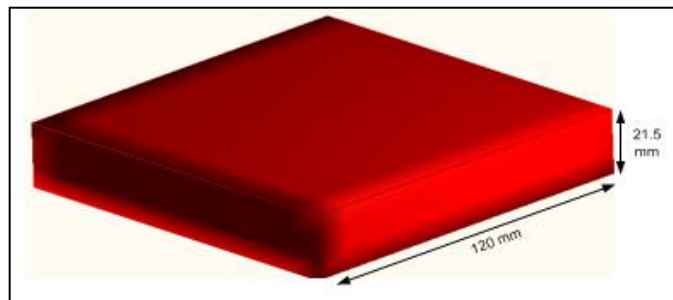
empat dan segi-enam), dan t adalah tebal . Dalam simulasi ini digunakan 2 komponen utama, yaitu penumbuk (*impactor*) dan tabung spesimen. Komponen penumbuk dimodelkan dengan *8 node solid elemen* dan tabung spesimen dimodelkan dengan *2-line (plate)*.



Gambar 3.3 Menunjukkan geometri dari tabung yang dianalisis

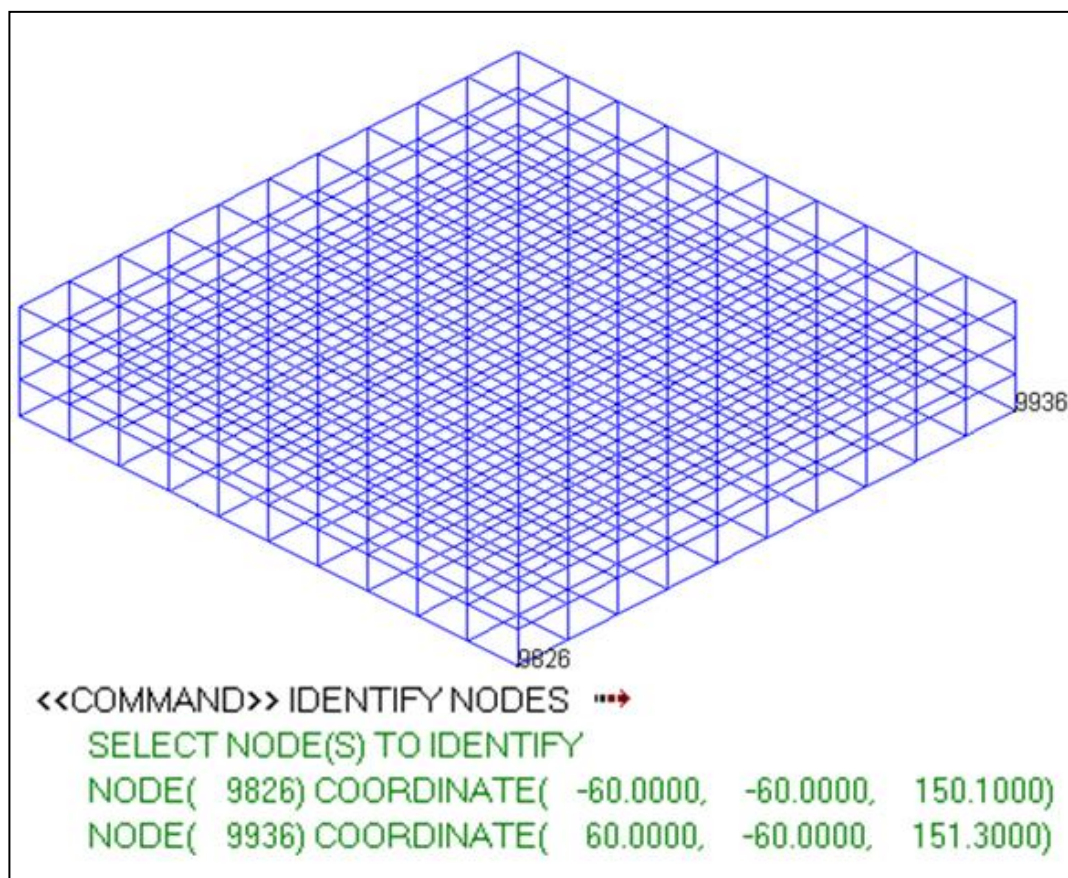
3.3.1 Penumbuk (*impactor*)

Penumbuk dimodelkan solid yang dibuat dengan 8 Kurva. Meshing pada LS-DYNA menggunakan bantuan *Mesh On plate/ Solid* dengan memilih *8 Line Solid*. Jumlah elemen pada penumbuk dapat diabaikan karena penumbuk di asumsikan jauh lebih kaku dari uji, Oleh karena itu dimodelkan sebagai benda rigid yang tidak mengalami deformasi ketika terjadi tumbukan. Ukuran penumbuk model penuh dibuat dengan lebar 120 mm dan ketebalan 21.5 mm . Massa penumbuk yang digunakan pada kaji parametrik sebesar 40 Kg . Gambar 3.4 menunjukkan model penumbuk (*impactor*).



Gambar 3.4 Hasil pemodelan *Impactor*

Model penumbuk dibuat miring terhadap tabung spesimen uji sesuai dengan kondisi penumbuk sebenarnya pada alat uji tumbuk. Gambar 3.5, menunjukkan meshing dari pada pemodelan penumbuk. Node 9826 dan node 9936 merupakan node yang digunakan untuk mengetahui ketinggian posisi pada koordinat z. Dari gambar dapat diketahui bahwa node 9826 memiliki ketinggian sebesar 150.10 mm sedangkan node 9936 memiliki ketinggian sebesar 151.30 mm sehingga kemiringan penumbuk sepanjang sumbu x sebesar 1.2 mm. Untuk melihat kondisi penumbuk sebenarnya terdapat pada [lampiran A-8].

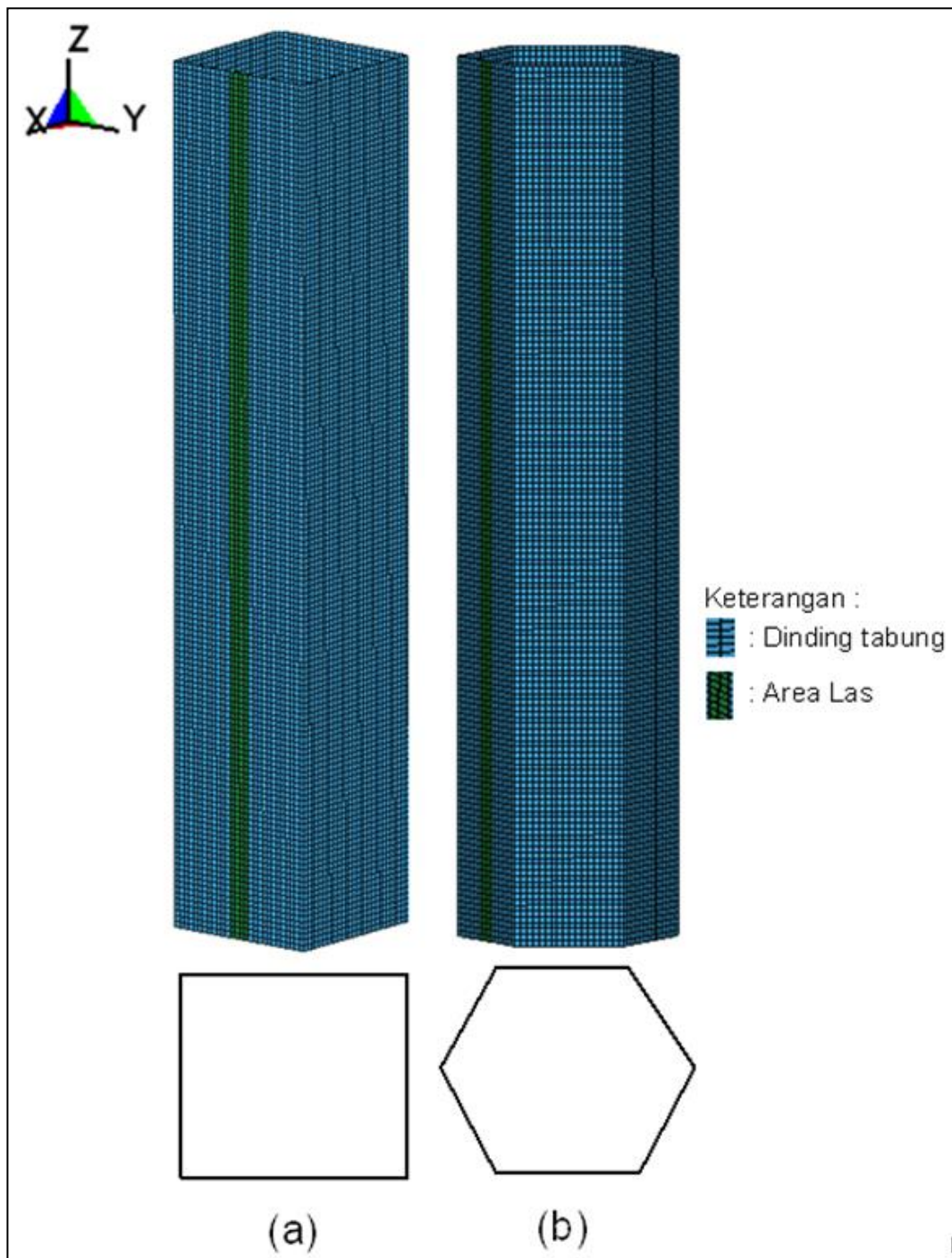


Gambar 3.5 Pemodelan meshing penumbuk

3.3.2 Tabung spesimen

Semua spesimen tabung berdinding tipis dimodelkan dengan menggunakan elemen cangkang Belytschko-Tsay. Besar elemen yang digunakan 1 x 1 (mm) untuk setiap elemen sesuai dengan studi konvergensi yang telah

dilakukan. Gambar 3.6 menyajikan model tabung yang telah dilakukan *meshing* pada LS-DYNA.



Gambar 3.6 model tabung , (a) tabung segi-empat; (b) tabung segi-enam

3.4 Data material

Ada tiga jenis material yang digunakan dalam simulasi ini, yaitu material untuk tabung, untuk daerah sambungan (*welding area*), dan untuk *impaktor*.

3.4.1 Material tabung

Material yang digunakan dalam pemodelan sama dengan material yang digunakan pada eksperimen yaitu AL 6061 T4, dengan properti seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Properti dari material Aluminium AL 6061 T4

E (Young's Modulus)	68.9 Gpa
σ_{ys}	0.1454 Gpa
ν	0.3
ρ	2.7×10^{-6} kg/mm ³
n (<i>power law exponent</i>)	0.23

Harga properti yang didapat berasal dari referensi ASM [www.asm.matweb.com], karena hasil uji tarik yang telah dilakukan pada material AL 6061 T4 tidak valid sehingga tidak dapat digunakan dalam input material pada model tabung. Untuk hasil uji tarik yang telah dilakukan terdapat pada [lampiran A-1](#).

Model material yang digunakan pada LS-DYNA adalah *material Piecewise linier plasticity*, digunakannya material jenis ini karena dapat memodelkan material elasto-plastik yang mengikutsertakan *strain rate effect*. Input yang dapat diberikan cukup lengkap dan tidak terlalu sulit untuk didapat, kekurangan model ini hanya mampu memodelkan material *isotropic*.

Harga tegangan dan regangan material yang berasal dari uji tarik merupakan harga *nominal stress* dan *nominal strain*. Pada LS-DYNA pendefinisian data plastisitas harus menggunakan *true stress* dan *true strain*. Hal ini dikarenakan LS-DYNA harus menginterpretasikan data input secara tepat. Oleh sebab itu *nominal stress* dan *nominal strain* yang didapat harus dikonversi menjadi *true stress* dan *true strain*.

➤ *True strain*

Hubungan antara *true strain* dan *nominal strain* dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\varepsilon_{nom} = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - \frac{l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad (3.1)$$

Dengan memberikan log natural pada kedua sisi persamaan maka kita akan mendapatkan hubungan antara *true strain* dan *nominal strain* yaitu :

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (3.2)$$

➤ *True stress*

Hubungan antara *true stress* dan *nominal stress* dapat dibentuk dengan mempertimbangkan sifat alamiah *incompressible* dari deformasi plastis dan mengasumsikan bahwa deformasi elastis volumetrik diabaikan, sehingga :

$$l_0 A_0 = l A \quad \Leftrightarrow \quad A = \frac{l_0 A_0}{l} \quad (3.3)$$

Persamaan *true stress* adalah

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.4)$$

Dengan mensubstitusi A ke definisi *true stress* sehingga :

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{l}{l_0} = \sigma_{nom} \left(\frac{l}{l_0} \right), \text{dimana } \frac{l}{l_0} = 1 + \varepsilon_{nom} \quad (3.5)$$

Sehingga hubungan antara *true stress* dan *true strain* menjadi

$$\sigma = \sigma_{nom} (1 + \varepsilon_{nom}) \quad (3.6)$$

Data *true strain* yang diperoleh untuk mendefinisikan sifat plastis dari material bukan merupakan data regangan plastis. Data tersebut merupakan total regangan yang terjadi pada material yang merupakan penjumlahan komponen regangan elastis dengan regangan plastis. Harga regangan plastis didapat dengan mengurangi total regangan dengan harga regangan elastis. Persamaan yang digunakan adalah

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon^t - \varepsilon^{el} = \varepsilon^t - \frac{\sigma}{E} \quad \varepsilon^{pl} : \text{true plastic strain} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon^t : \text{true total strain}$$

ε^{el} : true elastic strain

σ : true stress

E : Young modulus

Tabel 3.4 menyajikan data *effective plastic strain* dan *true stress* dari material Aluminium AL 6061 T4.

Tabel 3.4 Data *true stress* dan *true strain* untuk material AL 6061 T4

<i>Effective plastic strain (%)</i>	<i>True stress (Gpa)</i>	<i>True stress (Gpa) (welding part)</i>
0	0.146	0.142
1.51	0.170	0.165
3.75	0.199	0.193
5.29	0.222	0.215
8.84	0.238	0.230
11.39	0.249	0.242
14.00	0.258	0.250
15.62	0.260	0.252

True stress pada bagian sambungan (*welding part*) didapatkan dari uji *Microhardness vicker* [hasil pengujian ini terdapat pada [Lampiran A-2](#)]

3.4.2 Material penumbuk (*impactor*)

Material *impactor* dimodelkan dengan material *rigid*, Tabel 3.5 menyajikan properti material yang digunakan pada model *impactor*

Tabel 3.5 Properti dari material pada model *impactor*

E (Young's Modulus)	200 GPa
ν	0.3
ρ	$1.29 \times 10^{-4} \text{ kg/mm}^3$

3.5 Kondisi pembebanan dan kondisi batas

Pembebanan pada simulasi ini berupa tumbukan dari *impactor* yang diberi kecepatan awal yang bervariasi sesuai dengan kecepatan pada saat pengujian pada tabung segi-empat maupun pada tabung segi-enam dalam arah sumbu z (arah aksial). Sedangkan kondisi batas yang diterapkan pada model *impactor* dan model tabung terdapat pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Kondisi batas pada *impactor* dan tabung

Elemen	Translasi			Rotasi		
	x	y	z	x	y	z
<i>Impactor</i>	1	1	0	0	0	0
Tabung	1	1	1	1	1	1

Untuk model *impactor* dan model tabung diberi kondisi batas elemen sesuai dengan Tabel 3.6. Kondisi batas untuk tabung diberikan pada elemen paling bawah atau bagian alas dari tabung. Kondisi batas pada bagian alas tabung akan mewakili fungsi penyangga (*support*), sehingga pemodelan *support* tidak diperlukan lagi untuk menahan translasi arah Z. Notasi 1 pada tabel 3.5 berarti pergerakan pada arah tersebut di *fixed* atau ditahan dan notasi 0 berarti pergerakan pada arah tersebut dibebaskan atau *free*.

3.6 Kondisi kontak

Kondisi kontak sangat diperlukan dalam pemodelan ini, jika tidak diberikan kondisi kontak pada model maka saat dua buah benda melakukan kontak akibat tumbukan maka dua benda tersebut akan saling *overlap* atau lewat begitu saja. Hal

ini tidak sesuai dengan keadaan sebenarnya dimana jika dua benda melakukan kontak akibat tumbukan maka benda tersebut akan mengalami deformasi.

Ada tiga tipe kontak yang digunakan dalam pemodelan menggunakan LS-DYNA, yaitu *automatic node to surface*, *automatic single surface*, *automatic surface to surface*. Jenis kontak *automatic node to surface* digunakan pada kontak antara *impactor* dan tabung . Kontak tipe ini cocok untuk kontak sisi elemen *shell* pada suatu permukaan atau kontak elemen beam pada suatu permukaan. Kontak ini cocok digunakan pada kondisi kontak yang melibatkan benda pejal. Jenis kontak *automatic single surface* digunakan pada dinding-dinding tabung. Jenis kontak ini dapat mencegah penetrasi antar lipatan selama tabung mengalami *progressive buckling*. Kontak tipe ini cocok untuk aplikasi pada *crashworthiness*. Sedangkan jenis kontak *automatic surface to surface* digunakan untuk mengecek penetrasi antara dua jenis permukaan yang berbeda dalam hal ini permukaan material dan permukaan bagian sambungan.

3.7 Termination time

Termination time adalah parameter yang digunakan untuk menentukan waktu akhir analisis pada simulasi pemodelan LS-DYNA. Harga *termination time* diinput ke dalam parameter ENDTIME pada LS-DYNA. Harga ENDTIME pada pemodelan ini sebesar 38 ms. Harga ENDTIME ini sudah cukup untuk menunjukkan keseluruhan fenomena yang terjadi selama proses tumbukan sekitar 38 ms.

3.8 Output data

Parameter output LS-DYNA yang digunakan dalam pemodelan ini antara lain :

- D3PLOT yang berguna untuk visualisasi pemodelan. Interval waktu yang digunakan sebesar 0.1 ms. Sehingga terdapat 380 step hingga ENDTIME terjadi dengan kenaikan step sebesar 0.1 ms. Dengan menggunakan perangkat lunak post-processing pada LS-DYNA , file D3PLOT dapat di save as menjadi file .avi atau file video lainnya.

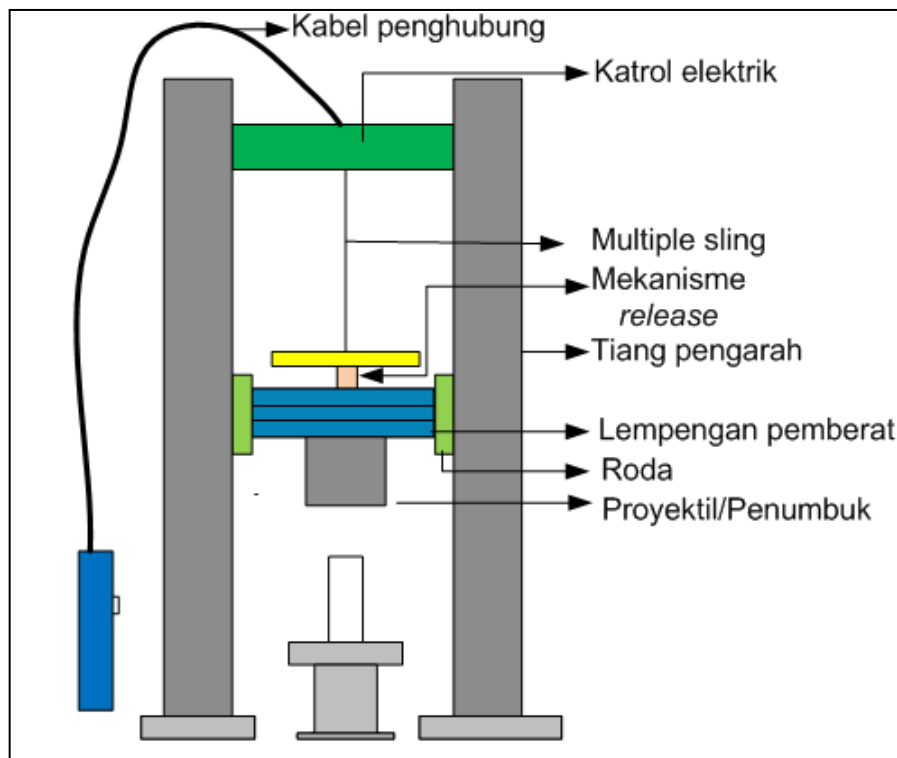
- RBDOUT, parameter ini menyajikan data waktu terhadap displacement. Interval waktu yang digunakan sebesar 0.005 ms. Sehingga data waktu-displacement yang diperoleh sebanyak 7600 data. Dengan kenaikan data tiap 0.005 ms.
- RCFORC, parameter ini menyajikan data waktu terhadap force. Interval waktu yang dipakai sebesar 0.005 ms. Sehingga data waktu-force yang diperoleh sebanyak 7600 data, dengan kenaikan data setiap 0.005 ms.

Dengan bantuan program *spreadsheet*, data waktu-perpindahan dan data waktu-gaya diubah menjadi data gaya-perpindahan yang menghasilkan *instantaneous force* (gaya instan) yang terjadi selama proses tumbukan.

Bab 4 Eksperimen tumbuk kecepatan rendah dan pengolahan data

Alat uji tumbuk pada Laboratorium penerbangan dulunya sudah ada, namun karena keterbatasan performa dan kinerja yang kurang baik, maka dilakukan disain alat uji tumbuk yang baru oleh Supemda Siahaan [19]. Sebelum alat tersebut dibuat, dilakukan modifikasi terhadap disain untuk mengatasi masalah keterbatasan proses produksi dalam membuat bentuk komponen yang diinginkan.

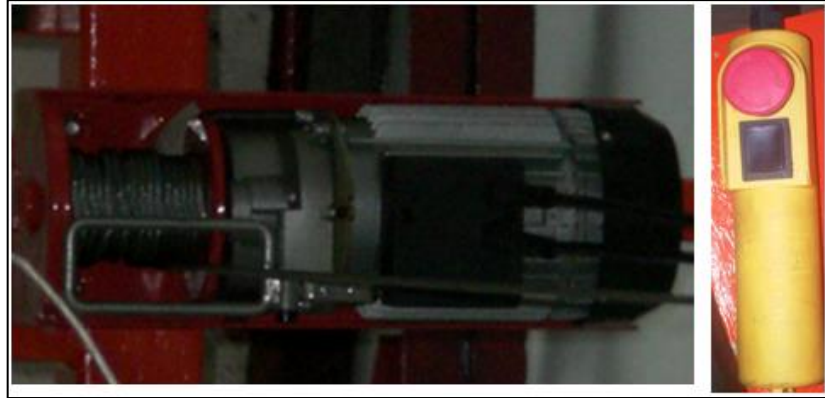
Ketinggian penumbuk ini sekitar ± 5 m. Kecepatan maksimum penumbuk (*impactor*) ± 9.89 m/s. Alat ini terdiri dari dua poros pengarah karena lebih efektif dan efisien [19]. Lempengan pemberat pada alat ini berbentuk bujursangkar karena memiliki *ease of manufacture* yang lebih tinggi dari pada lempengan berbentuk lingkaran[19]. Sedangkan berat maksimum alat uji tumbuk ini adalah 170 kg, sehingga alat ini dapat memenuhi kriteria untuk penelitian terutama kasus tumbukan kecepatan rendah. Skema gambar alat uji tumbuk ditunjukkan pada Gambar 4.1. Bentuk dan fungsinya akan dijelaskan pada bagian 4.1. (Alat uji tumbuk).



Gambar 4.1 Skema alat uji tumbuk

4.1 Alat uji tumbuk

4.1.1 Katrol elektrik



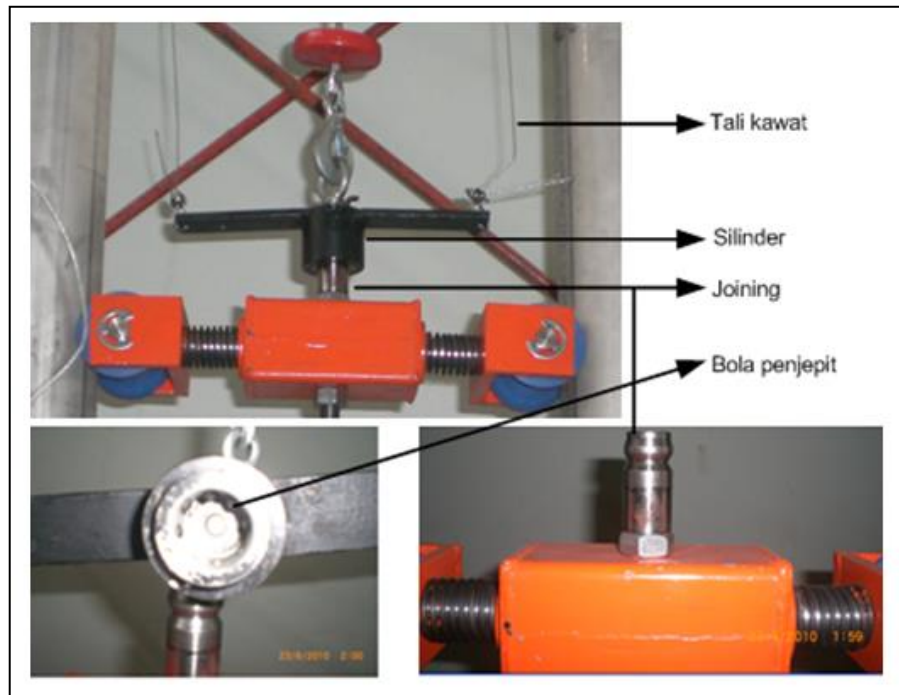
Gambar 4.2 Katrol Elektrik

Gambar 4.2 menunjukkan salah satu komponen pada alat uji tumbuk yaitu katrol elektrik. Katrol elektrik digunakan untuk mengangkat beban sesuai dengan ketinggian yang diinginkan, oleh karena itu terletak dibagian paling atas pada alat uji tumbuk. Elektrik katrol dilengkapi dengan *multiple sling* atau kawat yang tersusun atas beberapa ikatan serabut kawat dan berguna untuk mengangkat beban keatas atau kebawah sesuai keperluan penelitian dengan menggunakan sebuah kontroler . Berat maksimum yang mampu diangkat katrol adalah 650 Kg sesuai dengan ketentuan yang telah ditetapkan pabriknya. Sehingga alat ini cukup untuk mengangkat beban maksimum yang diperlukan untuk penelitian uji tumbuk ini.

4.1.2 Jepitan Pemberat

Gambar 4.3, menunjukkan gambar Jepitan pemberat [6] yang merupakan salah satu komponen yang cukup kompleks dan kritikal. Selain menahan beban maksimum 170 kg, jepitan pemberat harus dapat melepaskan beban pada ketinggian tertentu. Jepitan pemberat dibuat dengan menggunakan mekanisme *Quick release joint* atau *quick coupler* dimana terdiri dari penjepit yang berbentuk bola-bola kecil yang mengelilingi sebuah silinder. Pada sisi kiri atas dan kanan atas silinder diberi lengan dengan panjang salah satu sisi ± 10 cm. Lengan ini berfungsi untuk membantu mempermudah proses pelepasan jepitan, dengan cara menghubungkan ujung-ujung sisi lengan dengan tali kawat. Apabila tali kawat

ditarik keatas, silinder akan tertarik keatas dan bola-bola penjepit akan melonggarkan jepitannya mengikuti alur yang telah dibuat sedemikian rupa pada silinder sehingga beban terlepas dengan sendirinya.

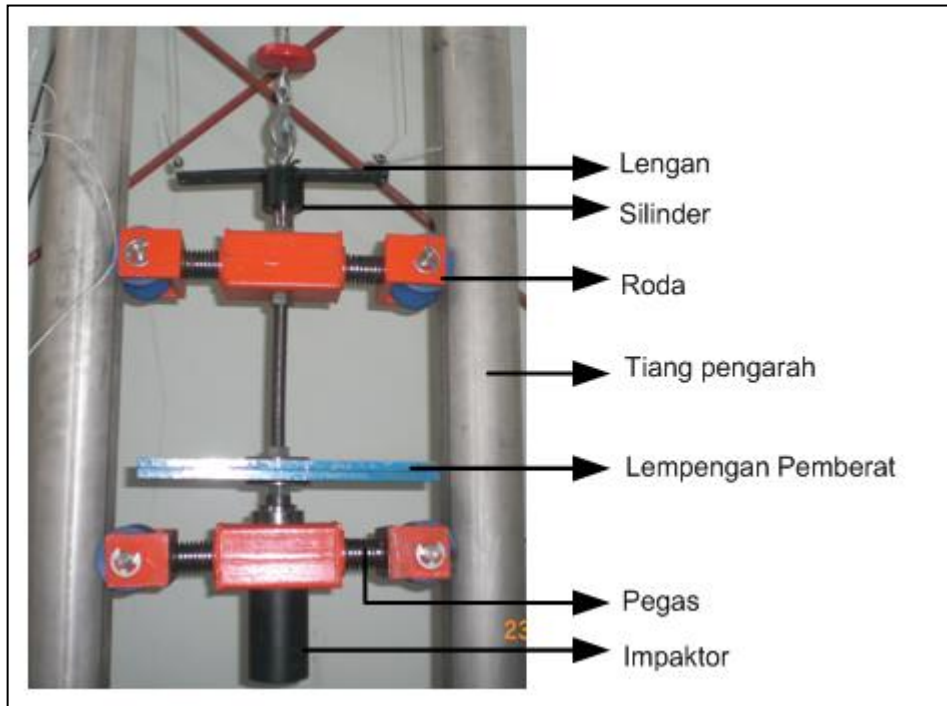


Gambar 4.3 Jepitan Pemberat [6]

4.1.3 Pengarah Pemberat

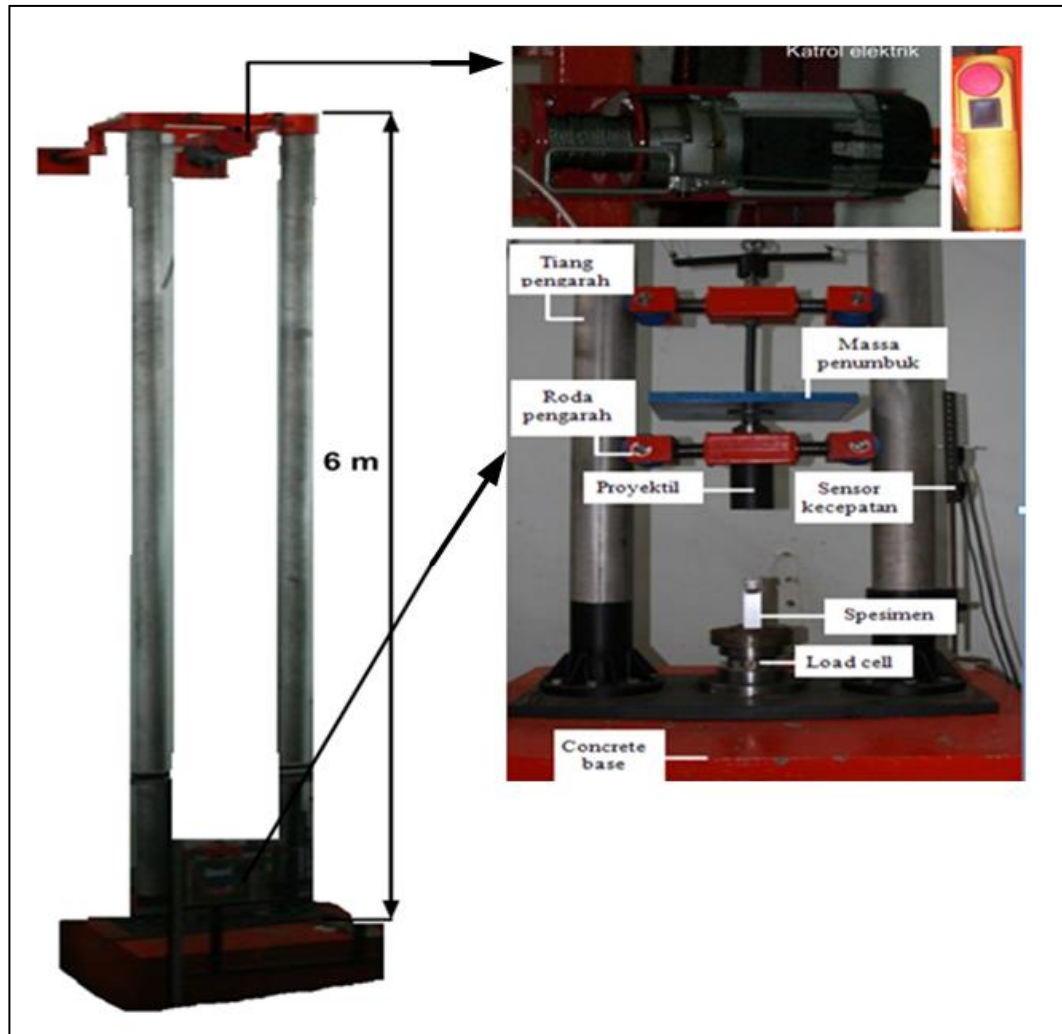
Pengarah pemberat [6] merupakan salah satu komponen yang dikembangkan dari alat uji tumbuk yang sudah ada, bentuk dan komponennya terdapat pada Gambar 4.4. Pengarah pemberat juga merupakan komponen yang penting dalam alat uji tumbuk. Selain mengarahkan beban yang di uji, komponen ini juga harus mempunyai gesekan yang kecil sehingga penguji dapat dengan mudah memprediksi ketinggian dari beban yang akan dilepaskan. Komponen ini juga harus aman dan tahan terhadap gaya yang bekerja terutama pada saat tumbukan ke spesimen uji. Pada gambar 4.3, ditunjukkan pengarah pemberat yang terdiri dari roda, pegas dan proyektil (*impactor*). Roda pada pengarah pemberat berjumlah 4 yang terbuat dari *hardnylon*. Setiap roda bergerak bebas pada tiang pengarah yang berfungsi untuk memperkecil gesekan yang terjadi antara pengarah pemberat dengan tiang pengarah. Pegas berfungsi untuk memastikan posisi roda selalu menekan ke tiang pengarah. Sedangkan proyektil berguna untuk

menumbuk tabung spesimen uji yang terbuat dari material ST-60. Berat bersih pengarah pemberat tanpa adanya lempengan pemberat adalah sebesar 20 kg.



Gambar 4.4 Pengarah pemberat [6]

Gambar 4.5, menunjukkan keseluruhan komponen alat uji tumbuk. Alat uji tumbuk dilengkapi dengan peredam atau dumper yang digunakan untuk meredam getaran akibat terjadinya tumbukan sehingga benda-benda disekitar alat uji seperti kaca dan benda-benda yang lainnya tidak ikut bergetar. Peredam ini dibuat dengan menggali permukaan lantai sedalam 1 m dan kemudian di beton dengan ketinggian 1.5 m, sehingga beton tersebut lebih tinggi 0.5 m dari permukaan lantai. Peredam ini tepat berada dibawah alat uji tumbuk sehingga getaran yang terjadi pada saat tumbukan dapat diserap oleh cor-coran dan diteruskan ke tanah. Selain itu alat uji tumbuk ini juga dilengkapi dengan sistem akusisi data , yang digunakan untuk mengetahui besarnya gaya yang terjadi selama tumbukan berlangsung.



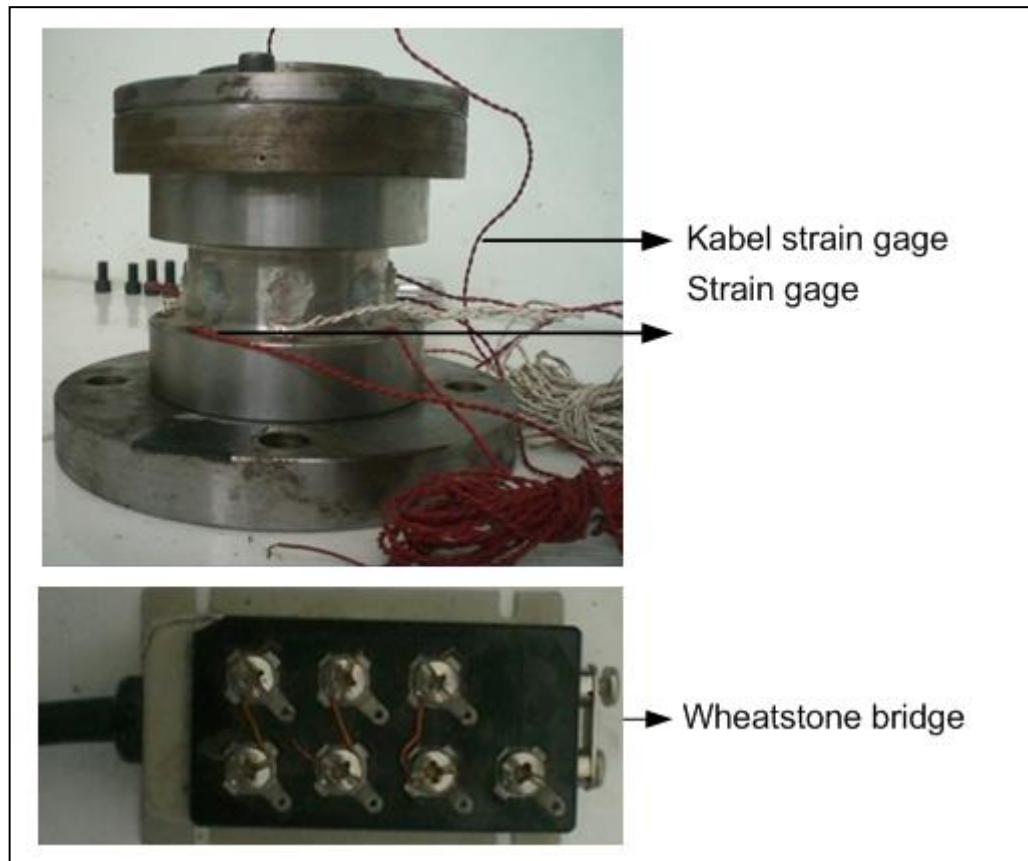
Gambar 4.5 Alat Uji tumbuk

4.2 Sistem sensor gaya

4.2.1 Load cell

Load cell dikelompokkan sebagai transduser gaya (*force transducer*). Alat ini mengubah gaya atau beban menjadi sinyal elektrik. *Load cell* pada sistem akuisisi data ini didisain oleh Vu Chi Tanh [20], material yang digunakan pada *load cell* adalah AISI 431 memiliki kekakuan yang tinggi, untuk mencegah deformasi plastis. Memiliki *yield strength* 600 Mpa dan *Modulus elasticity* 200 Gpa. Bentuk *Load cell* dan komponennya terdapat pada Gambar 4.6. Komponen yang terdapat pada *load cell* adalah *strain gauge*. *Strain gauge* terbuat dari konduktor yang mengukur regangan sebuah benda apabila benda tersebut

mengalami tegangan. Pada sistem ini, dua strain gage axis-simetry di pasang pada *load cell*, memiliki *gauge length* $e = 6 \text{ mm}$, Tahanan = 120Ω dan *gauge factor* = 2.15. Dua *strain gauge axis-simetry* yang dipasang pada *load cell* dirangkai secara parallel pada *wheatstone bridge*. *wheatstone bridge* berfungsi untuk merubah regangan yang terjadi pada *strain gauge* kedalam bentuk tahanan.



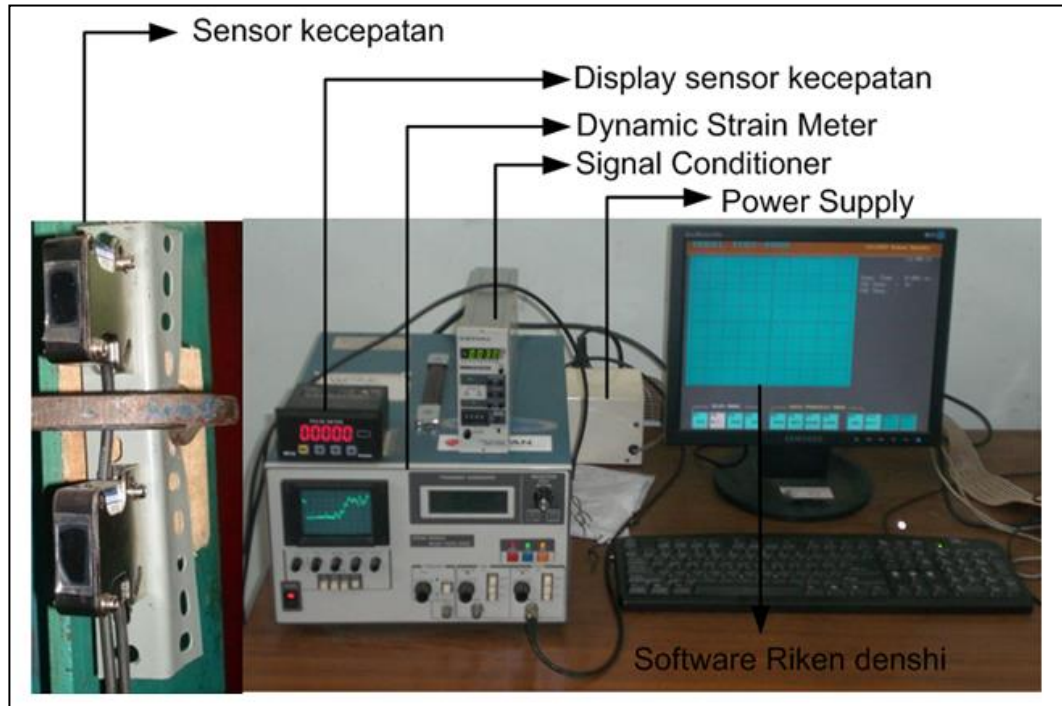
Gambar 4.6 Load cell dan komponennya

Wheatstone bridge yang digunakan pada sistem akusisi data ini adalah Kyowa yang terdapat pada Gambar 4.6.

4.2.2 Signal conditioner dan sensor kecepatan

Gambar 4.7, menunjukkan sistem akusisi data yang terdiri dari *signal conditioner*, *Dynamic strain meter*, dan sensor kecepatan. *Signal conditioner* yang digunakan adalah Kyowa-CDV -700 A. Alat ini dilengkapi dengan maximum gain atau penguat sinyal maximum mencapai 10000 kali.

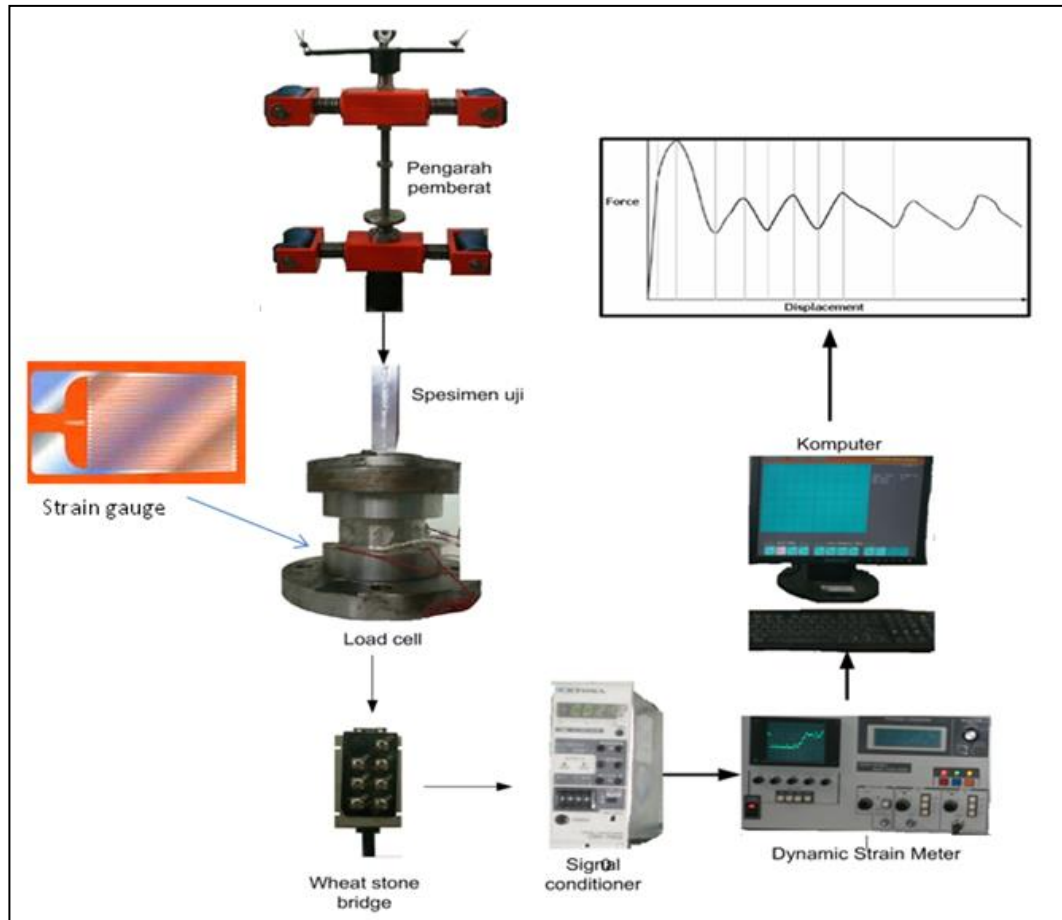
Salah satu channel output dari *signal conditioner* dihubungkan ke *transient converter* yang berguna untuk menampilkan perubahan tegangan yang terjadi dalam bentuk display gambar pada saat tumbukan.



Gambar 4.7 Sistem Akusisi Data

Pada *transient converter* perubahan tegangan di konversi kedalam bit yang disimpan dalam format *.DAT* dengan bantuan software *TCSYS.EXE*. Penghubung antara *transient converter* dengan software Riken Denshi menggunakan *ADC (Analog to Digital Converter)*. Data yang didapat dikomputer akan di konversikan dalam bentuk gaya dan interval waktu maksimum sebesar 41 ms.

Sensor kecepatan *autonic* digunakan untuk mendeteksi kecepatan awal tumbukan pada saat pengujian eksperimen. Sensor kecepatan tersebut dilengkapi dengan *display* untuk mengetahui besarnya kecepatan awal tumbukan dalam satuan *m/s* . Hasil dari kecepatan awal tumbukan yang diperoleh dari setiap hasil pengujian eksperimen digunakan sebagai parameter input kecepatan pada pemodelan LS-DYNA.



Gambar 4.8 Skema sistem sensor gaya

Gambar 4.8, menunjukkan skema sistem sensor gaya yang terdapat pada alat uji tumbuk. Pada saat pengaruh pemberat menumbuk tabung spesimen, maka regangan yang terjadi pada tabung spesimen diukur oleh dua *strain gauge* yang dipasang secara axis-simmetry pada *load cell*. Dua *strain gauge* dirangkai parallel pada *wheatstone bridge* agar regangan yang terjadi pada masing-masing *strain gauge* dikonversikan dalam bentuk penjumlahan tahanan. Sedangkan *signal conditioner* yang terhubung ke *wheatstone bridge* berfungsi untuk merubah tahanan menjadi tegangan atau *voltase*. Salah satu output *signal conditioner* dihubungkan ke *dynamic strain meter*. *Dynamic strain meter* berfungsi untuk megkonversikan perubahan tegangan yang terjadi pada *signal conditioner* dalam bentuk bit dengan format. DAT.

Bit yang dihasilkan diolah sesuai dengan persamaan yang ada pada buku manual *Dynamic strain meter* untuk mengetahui perubahan tegangan yang terjadi [persamaan terdapat pada [lampiran A-3](#)]. Untuk mengetahui gaya respon tabung akibat tumbukan, maka perubahan tegangan yang telah diolah menggunakan persamaan yang terdapat pada buku manual dikalikan dengan faktor kalibrasi dari *load cell* dalam satuan (N/V). Data kalibrasi *load cell* akan dibahas pada bagian 5.2.

4.3 Persiapan eksperimen uji tumbuk

Persiapan eksperimen uji tumbuk memerlukan waktu yang cukup lama karena dilakukan secara bertahap. Kegiatan ini dimulai dari persiapan tabung spesimen uji seperti geometri yang direncanakan dan material yang digunakan. Beberapa proses dilakukan dalam pembuatan tabung spesimen uji, karena tabung yang akan digunakan dibuat dari material aluminium dalam bentuk lembaran. Akibatnya pembuatan tabung spesimen diakhiri dengan proses pengelasan dibagian salah satu sisi tabung.

Setelah pengerjaan pembuatan spesimen tabung dilakukan, maka pengujian tarik dan pengujian *Microhardness Vicker* juga dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik dari material tersebut. Kalibrasi *load cell* juga dilakukan sebelum eksperimen uji tumbuk. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan nilai faktor kalibrasi dari respon *load cell* terhadap pembebanan yang diberikan.

4.3.1 Persiapan tabung spesimen

Tabung yang digunakan untuk eksperimen uji tumbuk dibuat dari material AL 6061 T4 dalam bentuk lembaran.

Kriteria pengelompokan geometri tabung yang direncanakan untuk material AL 6061 T4 tertera pada Tabel 4.1. Tabung spesimen yang direncanakan terdiri dari dua penampang yaitu segi-empat dan segi-enam. Keliling penampang bervariasi mulai dari 112 mm sampai dengan 184 mm, sedangkan ketebalannya sama untuk setiap tabung yaitu sebesar 0.8 mm.

Tabel 4.1 Konfigurasi geometri tabung spesimen

Thickness(mm)	Perimeter(mm)	
	Segi-empat	Segi-enam
0.8	112	112
0.8	124	124
0.8	136	136
0.8	148	148
0.8	160	160
0.8	172	172
0.8	184	184

4.3.2 Pembuatan tabung spesimen

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada awal bab ini, Pembuatan tabung spesimen dari lembaran aluminium (*sheet*) memerlukan waktu yang lama karena untuk menemukan ahli yang bisa membuat tabung spesimen uji melalui proses pengelasan khususnya pada material aluminium sangat jarang sekali. Pada akhirnya pembuatan tabung dalam hal ini yaitu proses pengelasan dilakukan di PT.DI.

Adapun proses yang dilalui dalam pembuatan tabung spesimen adalah sebagai berikut :

1. Pemotongan material. Pemotongan material dilakukan dengan alat pemotong CNC sesuai dengan keliling yang telah direncanakan. Hasil pemotongan pada material ditunjukkan pada Gambar 4.9.
2. Penekukan material. Penekukan material dilakukan karena penampang tabung spesimen yang direncanakan terdiri dari segi-empat dan segi-enam. Penekukan dilakukan dengan mesin press CNC. Hasil penekukan pada material ditunjukkan pada Gambar 4.10.
3. Sambungan material. Sambungan material dilakukan dengan menggunakan proses pengelasan yang merupakan tahap akhir dari proses pembuatan tabung spesimen. Proses pengelasan untuk material aluminium sangat sulit dilakukan jika tidak ditangani oleh tenaga ahli, oleh karena itu pengelasan material dilakukan lewat jasa tenaga ahli dari PT.DI. Jenis spesifikasi yang digunakan dalam pengelasan adalah pengelasan kelas 3

(referensi PT.DI) , dimana hasil dari pengelasan tidak di cek kembali kualitasnya menggunakan alat inspeksi X-Ray dan NDI. Hasil pengelasan ditunjukkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.9 *Cutting material AL 6061 T4 dengan alat CNC*



Gambar 4.10 *Pressing material AL 6061 T4 dengan alat CNC*



Gambar 4.11 Pengelasan material AL 6061 T4

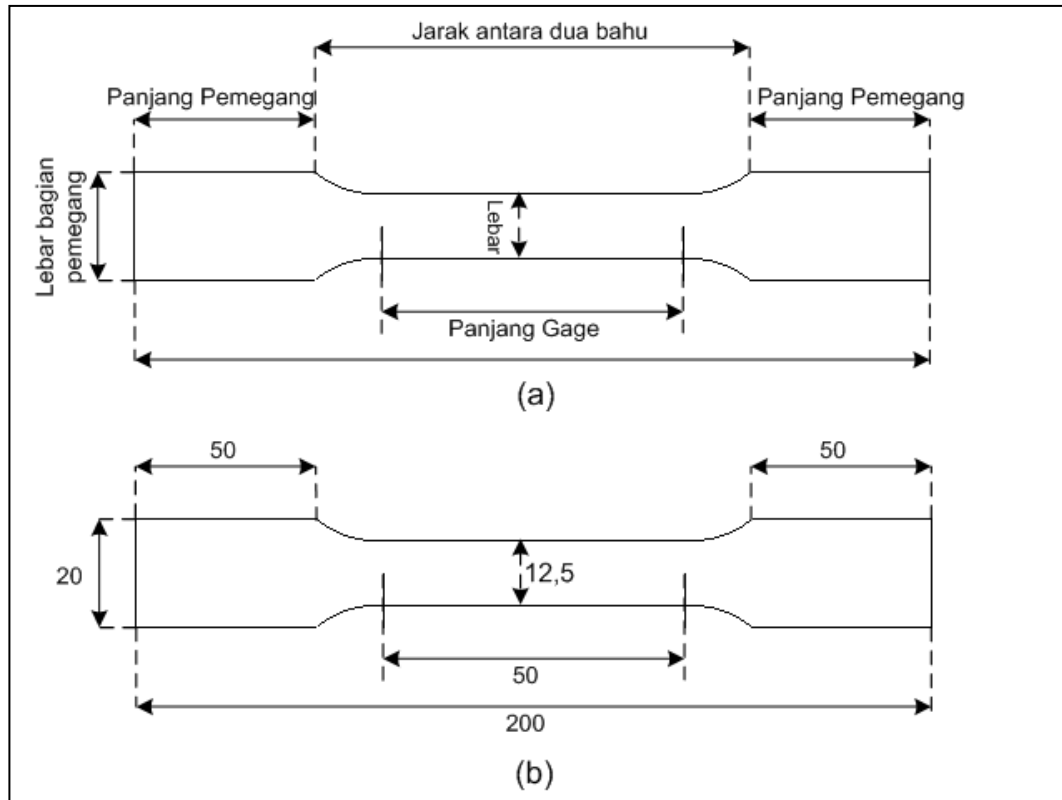
4.3.3 Uji tarik

Data dari uji tarik bertujuan untuk mendapatkan grafik hubungan antara tegangan dan regangan. Dari grafik ini diperoleh sifat-sifat mekanik material seperti *modulus elastisitas*, *yield strength*, *ultimate strength* dan *modulus strain hardening*.

Uji tarik ini dilakukan dengan memotong tabung tersebut sesuai dengan ukuran standar uji tarik untuk pelat tipis yang mengikuti aturan ASTM vol 03.01 E-97a *Tension testing of metallic materials* . Gambar ukuran standar uji tarik tertera pada Gambar 4.12.

Ukuran dari uji tarik ini boleh lebih kecil dari ukuran yang tertera dalam gambar dengan syarat ukuran yang baru ini proposional dengan ukuran standar [6]. Uji tarik dilakukan dengan menggunakan tiga , yang pengerjaannya dilakukan di PT.DI. Namun hasil yang diperoleh tidak valid karena harga modulus elastisitas jauh lebih rendah dari pada aluminium berdasarkan referensi ASTM [www.asm.matweb.com]. Sehingga properti dari AL 6061 T4 menggunakan pendekatan ASTM yaitu sebagai berikut :

Modulus elastisitas	: 68,9 GPa
Kekuatan luluh (<i>yield strength</i>)	: 145,4 MPa
Ultimate strength	: 224,6 MPa



Gambar 4.12 Ukuran uji tarik (a). Defenisi ukuran tiap bagian (b)Ukuran dalam satuan millimeter (*mm*).

Harga dari sifat mekanik diatas digunakan untuk parameter input pada analitik serta pemodelan numerik dengan menggunakan *software Ls-Dyna*. (Hasil pengukuran uji tarik material terdapat pada [lampiran A-1](#)).

4.3.4 Pengujian *Microhardness Vicker*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan mekanik pada daerah hasil sambungan salah satu sisi tabung spesimen uji setelah melalui proses pengelasan dengan menggunakan alat *microhardness vicker* yang terdapat pada Laboratorium Teknik Material Institut Teknologi Bandung. Pengujian ini dilakukan dengan cara memberikan pembebanan dengan cara identasi (penusukan) pada permukaan spesimen uji sebesar 0.2 kg. Identasi dilakukan dengan menggunakan indenter berbentuk piramida. Hasil identasi berbentuk lubang diagonal dalam ukuran mikrometer. Harga kekerasan dalam VHN diperoleh setelah mengkonversikan panjang diagonal yang diukur pada alat tersebut. Harga dari kekerasan *microhardness vickers* (dengan indenter berbentuk

piramida yang terbuat dari intan) adalah beban yang dipakai (*kgf*) dibagi dengan luas area dari penusukan (*mm²*).

Jumlah spesimen yang diuji adalah tiga spesimen, dimana satu spesimen mempunyai jumlah total pengujian 15 titik yang diuji sepanjang 22 mm (panjang). Metode ini dimaksudkan untuk mengetahui distribusi harga kekerasan yang mewakili seluruh permukaan. Dari uji *mickovickers hardness* diketahui bahwa harga kekerasan pada area sambungan (*welding area*) menurun 2.8% jika dibandingkan dengan kekerasan pada *base metal* dan *HAZ*. Harga mekanik yang didapat digunakan untuk parameter input pada pemodelan numerik dengan menggunakan *software Ls-Dyna*. (Untuk hasil pengukuran identasi dilampirkan pada [lampiran A-2](#)).

4.3.5 Kalibrasi *load cell*

Untuk dapat diaplikasikan sebagai sensor pada alat uji tumbuk, *load cell* harus dikalibrasi dengan menggunakan alat uji kompresi yaitu *Tarno Grocki* yang terdapat gambar 4.13. Beban yang diberikan pada *load cell* ditingkatkan secara bertahap mulai dari 5000 Newton sampai harga beban maksimum sebesar 45.000 Newton. *Load cell* dihubungkan ke *signal conditioner* untuk mengetahui perubahan harga tegangan (*voltase*) yang dihasilkan pada saat beban ditambah secara bertahap sebesar 5000 Newton pada *load cell*. Output yang dikeluarkan *signal conditioner* untuk setiap penambahan beban pada *load cell* berukuran *miliVolt*.

Pada gambar 4.12, ditunjukkan diagram beban yang diterima *load cell* terhadap respon output *Voltase* yang dihasilkan dari *signal conditioner*. Data kalibrasi pada Tabel 4.2 dan data diagram pada Gambar 4.14 menunjukkan respon dari *load cell* terhadap beban statik yang diberikan konsisten dan linear. Hasil dari data kalibrasi digunakan untuk mencari faktor kalibrasi (*k*) *load cell* dalam satuan (N/V). Faktor kalibrasi (*k*) digunakan dalam pengolahan metoda eksperimen untuk mengetahui besaran gaya (*force*) yang terjadi pada saat tumbukan. Pengolahan data secara lengkap dengan metoda eksperimen di jelaskan pada [lampiran A-3](#).

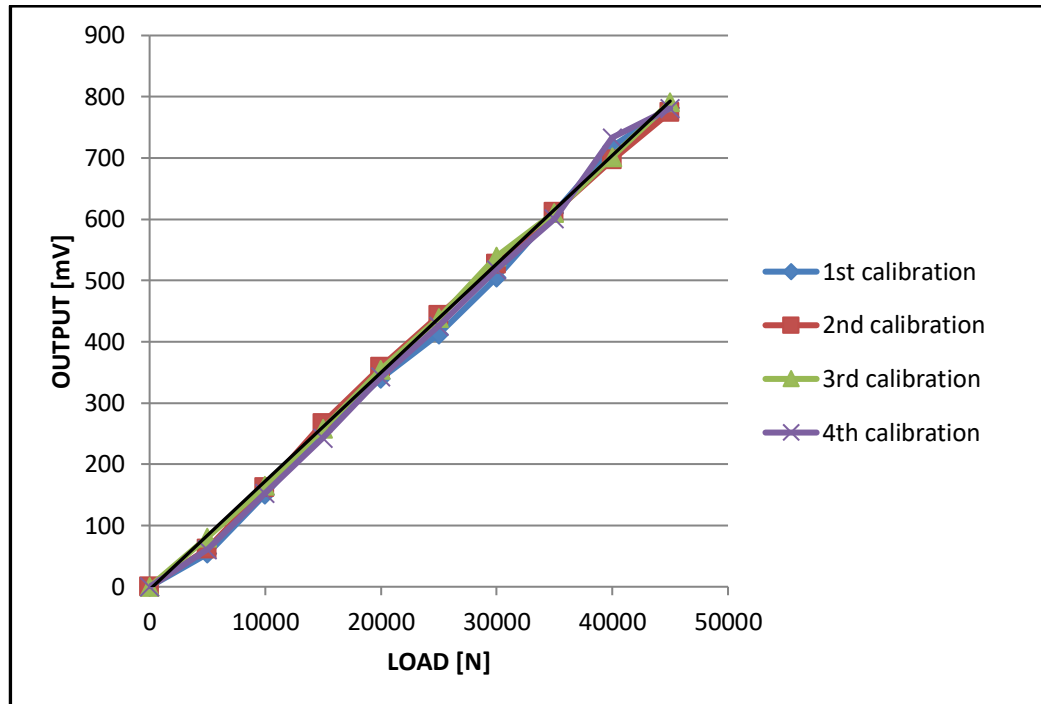
Berikut adalah data kalibrasi *load cell* uji kompresi statik pada alat *Tarno Grocki* :

Tabel 4.2 Data Kalibrasi

LOAD (N)	1 st calibration (mV)	2 nd calibration (mV)	3 rd calibration (mV)	4 th calibration (mV)
0	0	0	0	0
5000	54	62	81	61
10000	151	162	165	153
15000	255	267	258	243
20000	340	359	355	343
25000	412	443	439	426
30000	505	527	539	518
35000	611	612	611	601
40000	719	697	702	733
45000	782	775	791	781



Gambar 4.13 alat uji kompresi



Gambar 4.14 Diagram beban – output Voltase yang dihasilkan















4.3.6 Analisis gambar hasil dokumentasi

Setelah melakukan kegiatan pembuatan tabung untuk eksperimen uji tumbuk dengan melalui beberapa proses, maka dilakukan dokumentasi pada setiap geometri tabung terutama pada penampang tabung. Pengukuran geometri penampang tabung segi-empat dan segi-enam dilakukan setelah tabung mengalami uji tumbuk, sehingga pengukuran sulit dilakukan. Untuk mengatasi kesulitan pengukuran pada penampang tabung tersebut, digunakan hasil dokumentasi geometri penampang tabung yang belum ditumbuk. Lalu hasil dokumentasi tersebut diolah dan diukur dengan menggunakan perangkat *Microsoft visio*. Pengukuran geometri penampang tabung dengan menggunakan perangkat *Microsoft visio* dapat diolah dan diukur setelah salah satu bagian sisi pada penampang tabung yang telah ditumbuk diukur dan diketahui panjang sisinya (bagian yang diukur merupakan bagian sisi yang tidak berdeformasi / bagian bawah tabung) menggunakan jangka sorong dengan ketelitian hingga 0.05 mm. Hasil pengukuran untuk penampang tabung segi-empat dan segi-enam ditunjukkan pada tabel 5.1 dan tabel 5.2.

4.4 Prosedur pengujian tumbuk tabung eksperimen

Setelah melakukan persiapan eksperimen uji tumbuk seperti persiapan tabung spesimen, pembuatan tabung spesimen, uji tarik material tabung, kalibrasi *load cell*, dan *Microhardness Vicker test* untuk bagian sambungan yang terdapat disalah satu sisi pada tabung. Selanjutnya dilakukan pengelompokan pengujian tabung berdasarkan geometri tabung spesimen beserta data kecepatan awal tumbukan pada tabung.

Tabel 4.3 Geometri tabung segi-empat dan kecepatan awal tumbukan pada tabung















Set	Penampang	Keliling (mm)	t (mm)	t_w (mm)	L (mm)	M (Kg)	V (m/s)
1		112.91	0.80	1.50	158.50	40.00	5.02
2		118.40	0.80	1.45	158.00	40.00	5.11
3		128.64	0.80	1.50	160.00	40.00	5.09
4		130.40	0.80	1.50	160.00	40.00	5.07
5		142.00	0.80	1.35	161.00	40.00	4.94
6		139.20	0.80	1.50	161.00	40.00	5.06
7		158.70	0.80	1.50	160.00	40.00	4.89
8		157.60	0.80	1.50	160.00	40.00	5.01
9		163.40	0.80	1.50	161.00	40.00	4.94
10		168.02	0.80	1.40	162.00	40.00	4.94
11		179.50	0.80	1.50	161.00	40.00	5.04
12		174.62	0.80	1.50	162.00	40.00	5.03
13		189.28	0.80	1.40	161.00	40.00	5.02
14		190.70	0.80	1.50	160.00	40.00	5.23

Ket : t = tebal , t_w = tebal daerah sambungan, L = Tinggi tabung

M = Massa penumbuk , V = Kecepatan awal tumbukan impaktor

Tabel 4.3, menunjukkan geometri tabung segi-empat beserta dengan data kecepatan awal tumbukan pada tabung. Tiap-tiap tabung terdiri dari keliling yang berbeda.

Tabel 4.4 Geometri tabung segi-enam dan kecepatan awal tumbukan pada tabung

Set	Penampang	Keliling (mm)	t (mm)	t _w (mm)	L (mm)	M (Kg)	V (m/s)
1		107.55	0.80	1.42	157.00	40.00	4.96
2		108.60	0.80	1.50	158.00	40.00	4.97
3		124.19	0.80	1.50	158.00	40.00	4.94
4		126.12	0.80	1.43	161.00	40.00	4.97
5		135.19	0.80	1.50	160.00	40.00	4.86
6		137.20	0.80	1.51	157.00	40.00	4.90
7		156.68	0.80	1.53	160.00	40.00	4.98
8		156.12	0.80	1.51	161.00	40.00	-
9		158.92	0.80	1.50	161.00	40.00	5.07
10		159.12	0.80	1.48	161.00	40.00	-
11		173.43	0.80	1.50	161.00	40.00	5.03
12		172.15	0.80	1.50	161.00	40.00	-
13		181.42	0.80	1.50	161.00	40.00	5.20
14		182.10	0.80	1.50	160.00	40.00	5.11

Tabel 4.3, menunjukkan geometri tabung segi-enam beserta dengan data kecepatan awal tumbukan pada tabung. Tiap-tiap tabung terdiri dari keliling yang berbeda.

Dari hasil pengukuran geometri tabung yang terdapat pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 disimpulkan bahwa geometri tabung yang ada tidak sesuai dengan konfigurasi geometri yang direncanakan pada awal persiapan spesimen tabung.

Hasil analisis eksperimen uji tumbuk pada tabung segi-empat dan segi-enam tidak dilakukan untuk semua geometri tabung yang terdapat pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 karena banyaknya data yang gagal didapat pada sistem akuisisi data seperti data kecepatan dan data *instantaneous force* tabung.

Bab 5 Hasil analisis

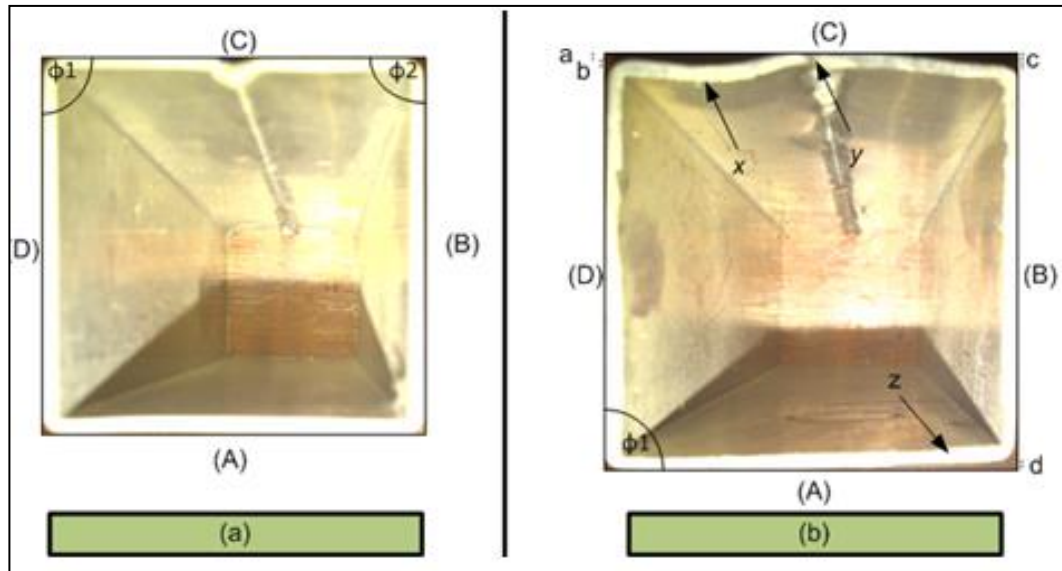
Pada bab ini , detail penampang geometri tabung segi-empat dan segi-enam untuk pengujian eksperimen akan dijelaskan secara kualitatif dan kuantitatif serta hasil eksperimental dan numerikal yang diperoleh antara lain deformasi akhir tabung, *instantaneous force* (grafik *force-displacement* yang menunjukkan reaksi gaya per *displacement* pada saat tumbukan terjadi), serta *mean crushing force* (grafik *force-displacement* yang menunjukkan besar gaya rata-rata yang dibutuhkan untuk terjadinya *displacement*) juga akan dipaparkan pada bab ini .

5.1 Detil geometri penampang tabung segi-empat dan segi-enam untuk eksperimen uji tumbuk

Pada bagian ini akan dibahas detail geometri tabung segi-empat dan segi-enam secara kualitatif dan kuantitatif sebelum melakukan uji tumbuk. Dalam studi kualitatif akan dijelaskan hasil proses produksi tabung khususnya pada bagian geometri penampang tabung, sedangkan dalam studi kuantitatif akan dijelaskan hasil pengukuran geometri penampang tabung berupa panjang sisi dan besar sudut antara dua sisi yang terdapat pada penampang.

5.1.1 Tabung segi-empat

Gambar 5.1, menunjukkan dua tabung (*a*) dan (*b*) yang berbentuk segi-empat dengan keliling 139.20 mm dan 168.02 mm. Secara kualitatif , penampang tabung (*a*) lebih baik dibandingkan penampang tabung (*b*). Pada tabung (*b*) terdapat beberapa ketidaksempurnaan pada bagian sisi-sisi penampang, hal tersebut terlihat jelas dengan adanya tonjolan kearah dalam (*x*) dan luar (*y*) pada sisi *C* serta pada sisi *A* terdapat kemiringan yang mengarah kedalam (*z*). Tabung (*a*) dan (*b*) merupakan dua tabung yang mewakili hasil proses produksi pembuatan tabung segi-empat yang digunakan untuk eksperimen uji tumbuk. Tabung (*a*) memiliki penampang paling sempurna jika dibandingkan dengan penampang tabung segi-empat lainnya, sedangkan tabung (*b*) sebaliknya.



Gambar 5.1 Geometri penampang tabung segi-empat

Tabel 5.1 , menunjukkan hasil pengukuran geometri penampang tabung secara kuantitatif. Keliling tabung paling kecil berukuran 112.91 mm dan keliling paling besar berukuran 190.70 mm. Untuk setiap tabung , pengukuran dilakukan pada empat sisi tabung yang ditandai dengan sisi (A), (B), (C), (D). Dapat diamati pada tabel, sisi yang saling berhadapan yaitu sisi (A) dan sisi (C) atau sisi (B) dan sisi (D) memiliki panjang sisi yang sama kecuali pada tabung dengan keliling 112.91 mm dimana hanya satu bagian sisi yang berhadapan memiliki panjang sisi yang sama yaitu sisi (B) dan (D) sedangkan sisi (A) dan sisi (C) memiliki panjang yang berbeda. Berdasarkan keterangan dari gambar 5.1 dan tabel 5.1 yang dijelaskan diatas, maka dapat disimpulkan bahwa hasil proses pembuatan tabung spesimen tidak konsisten pada panjang sisi-sisinya maupun ketidaksempurnaan penampang yang terdapat pada tabung. Hal tersebut merupakan pengaruh dari banyaknya proses yang dilalui untuk membuat sebuah tabung spesimen sebab material yang digunakan untuk membuat tabung spesimen berasal dari material yang berbentuk lembaran (*sheet*), tapi proses pengerjaannya tidak didukung oleh alat-alat yang memiliki tingkat ketelitian seperti yang diharapkan terutama pada saat penekukan tabung (*pressing*) dan pengelasan tabung (*welding*). Banyaknya ketidaksempurnaan yang terdapat pada penampang tabung menyebabkan pengukuran dibatasi terhadap panjang sisi-sisi, besar sudut

dan daerah yang memiliki ketidaksempurnaan pada penampang tabung . Ketidaksempurnaan penampang untuk setiap tabung dinyatakan dengan simbol x , simbol y dan simbol z . Simbol x menyatakan tonjolan penampang tabung mengarah kedalam, simbol y menyatakan tonjolan penampang tabung mengarah keluar dan simbol z menyatakan sisi penampang tabung miring. Untuk mengetahui letak simbol-simbol yang memiliki ketidaksempurnaan pada penampang tabung terdapat pada [lampiran A-4](#).

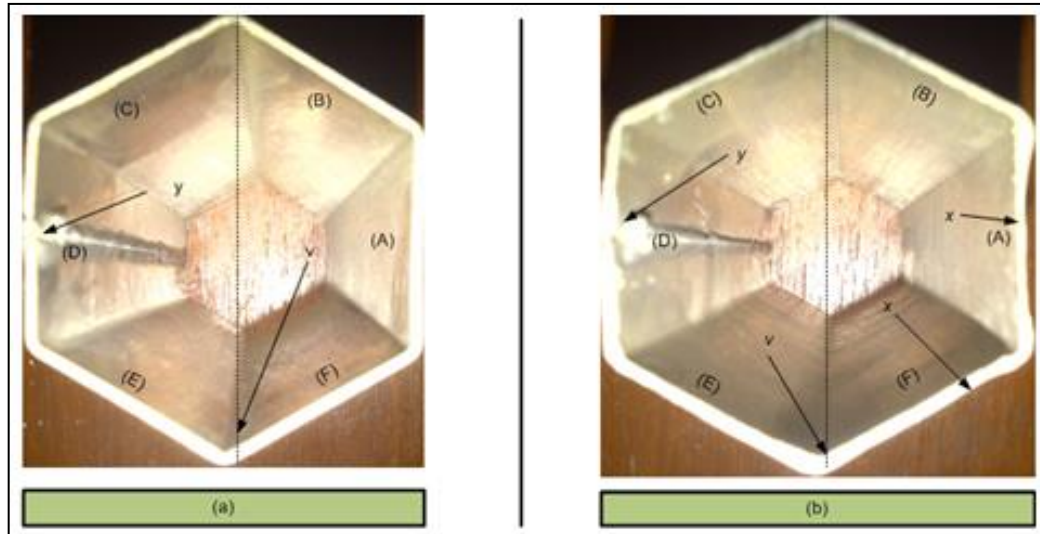
Tabel 5.1 Hasil pengukuran geometri penampang tabung segi-empat

Penampang	Keliling	Panjang sisi [mm]				sudut ($^{\circ}$)		Imperfection			
		A	B	C	D	ϕ_1	ϕ_2	a	b	c	d
Segi-empat	112.91	30.00	27.52	27.87	27.52	87.77	87.77	z	z	x	-
	128.64	32.32	32.00	32.32	32.00	90.00	-	x	x	-	-
	139.20	35.00	34.60	35.00	34.60	90.00	90.00	-	-	-	-
	157.60	39.25	39.55	39.25	39.55	95.00	93.00	y	y	y	y
	168.02	41.70	42.31	41.70	42.31	90.00	-	z	y	z	x
	179.50	44.75	45.00	44.75	45.00	90.00	-	z	y	y	-
	190.70	48.00	47.35	48.00	47.35	90.00	-	x	z	z	-

Ket : x = tonjolan kedalam, y = tonjolan keluar, z = miring kedalam

5.1.2 Tabung segi-enam

Gambar 5.2, menunjukkan dua tabung (a) dan (b) yang berbentuk segi-enam dengan keliling 155.68 mm dan 173.34 mm. Secara kualitatif , penampang tabung (a) lebih baik dibandingkan penampang tabung (b), meskipun masih terdapat ketidaksempurnaan pada penampang tabung (a). Pada tabung (b) ketidaksempurnaan pada bagian sisi-sisi penampang lebih banyak, hal tersebut terlihat jelas pada sisi A, sisi D , sisi F. Tabung (a) dan (b) merupakan dua tabung yang mewakili hasil proses produksi pembuatan tabung segi-enam yang digunakan untuk eksperimen uji tumbuk. Tabung (a) memiliki penampang paling sempurna jika dibandingkan dengan penampang tabung segi-enam lainnya, sedangkan tabung (b) sebaliknya.



Gambar 5.2 Geometri penampang tabung segi-enam

Tabel 5.2 , menunjukkan hasil pengukuran geometri penampang tabung secara kuantitatif. Keliling tabung paling kecil berukuran 108.60 mm dan keliling terbesar berukuran 181.42 mm . Setiap tabung segi-enam memiliki panjang sisi yang bervariasi pada setiap sisinya dan setiap bagian penampang tabung memiliki ketidaksempurnaan, sehingga ketidakkonsistenan geometri tabung segi-enam lebih banyak jika dibandingkan dengan tabung segi-empat. Oleh karena itu pengukuran geometri penampang tabung dibatasi pada panjang sisinya. Untuk pengukuran sudut yang terdapat diantara sisi tabung sangat sulit dilakukan karena sisi tabung umumnya tidak sejajar sedangkan ketidaksempurnaan yang terdapat pada penampang tabung hanya ditunjukkan melalui simbol-simbol tanpa dilakukan pengukuran.

Ketidaktepurnaan penampang tabung dinyatakan dalam beberapa simbol. Simbol x , y , z yang digunakan untuk menyatakan ketidaksempurnaan pada penampang tabung segi-empat juga digunakan untuk menyatakan ketidaksempurnaan penampang tabung segi-enam, dan untuk simbol v yang ada pada tabung segi-enam menyatakan sudut yang saling berhadapan pada tabung tidak sejajar. Untuk mengetahui letak simbol-simbol yang memiliki ketidaksempurnaan pada penampang tabung terdapat pada [lampiran A-5](#).

Tabel 5.2 Hasil pengukuran geometri penampang tabung segi-enam

Penampang	Keliling	Panjang sisi [mm]						Imperfection [mm]			
		A	B	C	D	E	F	a	b	c	d
segi-enam	108.60	18.70	18.30	17.60	18.00	18.70	17.30	v	y	-	-
	124.19	21.00	20.49	20.66	21.00	20.54	20.50	v	z	-	-
	135.19	22.70	22.59	21.23	22.50	23.19	22.98	v	z	y	-
	155.68	25.25	25.39	25.40	25.07	27.00	25.57	v	y	-	-
	158.92	25.50	27.46	25.36	27.00	27.10	25.50	v	x	x	-
	173.34	29.50	27.17	28.67	30.00	29.24	28.76	z	x	x	y
	181.42	30.00	30.22	29.96	30.00	30.57	30.67	v	y	-	-

Ket : v = sudut berhadapan tidak sejajar

5.2 Hasil uji tumbuk tabung segi-empat dan segi-enam menggunakan metode eksperimen dan metode numerik

Pada bagian ini, hasil-hasil yang didapat dari metode eksperimen dan metode numerik yang terdiri dari data kecepatan awal tumbukan tabung, data perpindahan total tabung, grafik *Instantaneous force* dan grafik *mean crushing force* hasil dari uji tumbuk tabung akan ditunjukkan.

5.2.1 Hasil eksperimen tabung segi-empat

Gambar 5.3, menunjukkan hasil uji tumbuk tabung segi-empat dengan keliling yang bervariasi selama selang waktu ± 38 ms. Besarnya perpindahan total tabung dapat ditentukan dari selisih panjang awal dan panjang akhir tabung. Pengukuran perpindahan total tabung dilakukan dengan menggunakan jangka sorong agar pengukuran yang dilakukan memberikan hasil yang lebih teliti. Hasil panjang akhir tabung terdapat pada [lampiran A-6](#).

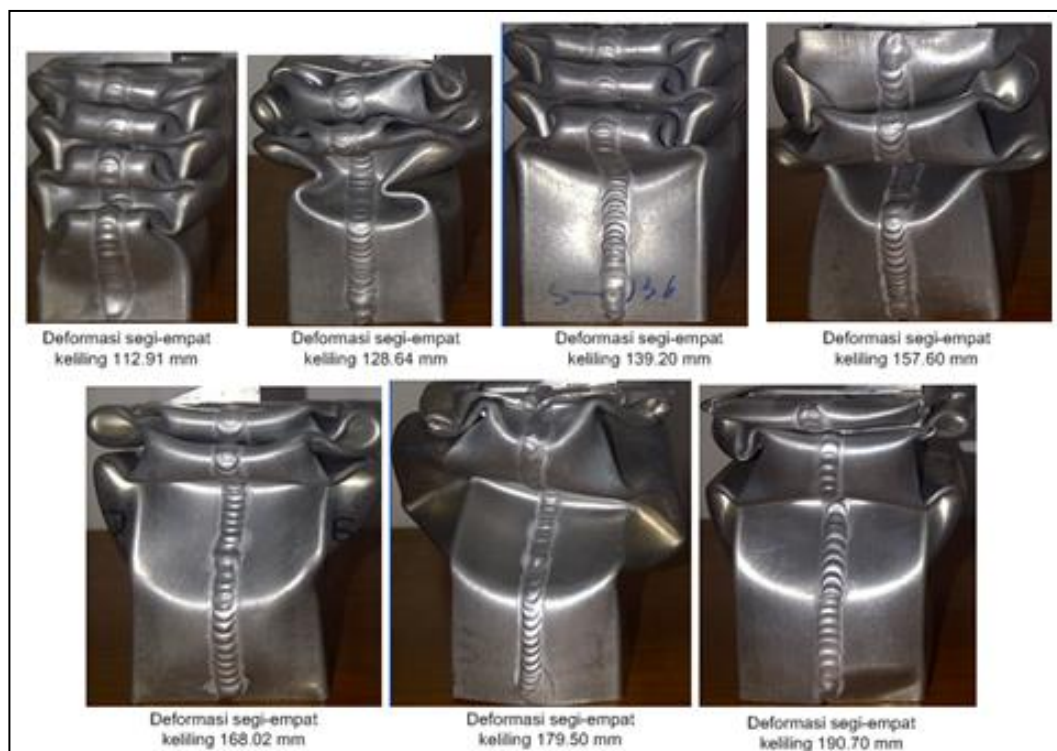
Tabel 5.3, menunjukkan harga perpindahan total tabung segi-empat dengan keliling yang bervariasi dari 112.91 mm sampai dengan 190.70 mm. Dapat diamati bahwa untuk tabung dengan keliling yang meningkat dari 112.91 mm sampai dengan 179.50 mm perpindahan total tabung cenderung makin kecil. Namun untuk tabung dengan keliling 190.70 mm harga perpindahan total tabung lebih besar dibandingkan tabung dengan keliling 179.50 mm. Hal tersebut dikarenakan untuk tabung dengan keliling 190.70 mm kecepatan awal tumbukan

lebih besar dibandingkan dengan kecepatan awal tumbukan tabung dengan keliling 112.91 mm hingga 190.70 mm yang hampir sama besarnya.

Kecepatan awal tumbukan pada tabung bervariasi untuk setiap kali pengujian, hal tersebut disebabkan oleh perbedaan ketinggian jatuh penumbuk.

Faktor yang mempengaruhi perbedaan ketinggian jatuh penumbuk antara lain :

1. Pengukuran ketinggian penumbuk dilakukan dengan menggunakan penggaris, sehingga mudah sekali terjadi kesalahan dalam penentuan ketinggian penumbuk yang telah ditentukan.
2. Proses pelepasan penumbuk (*release mechanism*) membutuhkan gaya tarik keatas agar penumbuk terlepas dari komponen release sehingga menyebabkan terjadinya perubahan ketinggian pada penumbuk yang telah diukur sebelumnya dengan menggunakan penggaris.



Gambar 5.3 Hasil uji tumbuk tabung berpenampang segi-empat

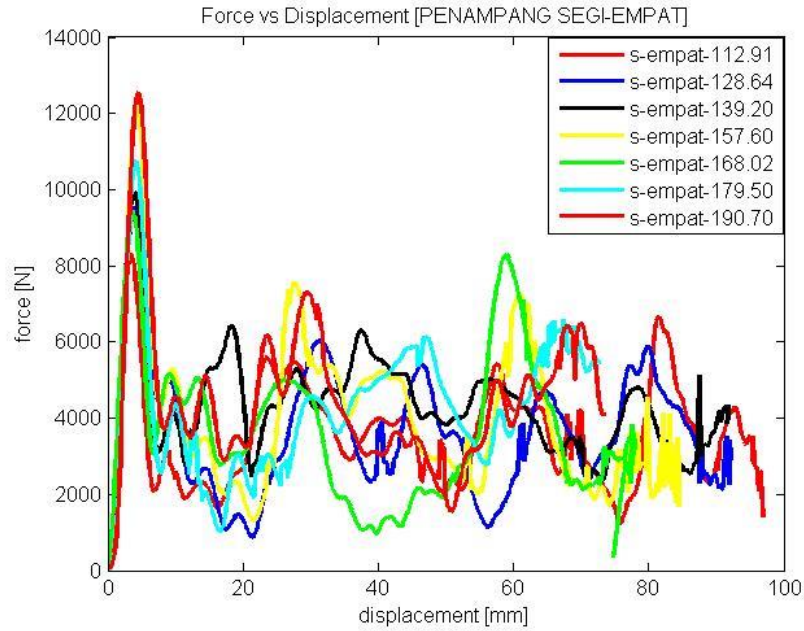
Tabel 5.3 Data perpindahan total tabung berpenampang segi-empat

Penampang	Keliling [mm]	Kecepatan [m/s]	Perpindahan total [mm]
Segi-empat	112.91	5.02	95.80
	128.64	5.09	92.00
	139.20	5.06	90.00
	157.60	5.01	83.00
	168.02	4.94	73.30
	179.50	5.04	72.80
	190.70	5.23	73.60

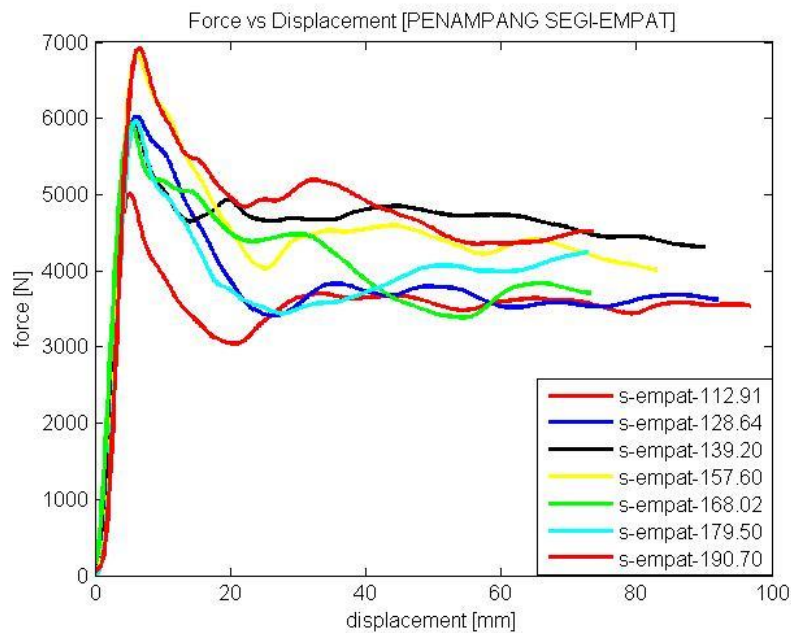
Gambar 5.4, menunjukkan grafik *instantaneous force* pada tabung segi-empat dengan keliling yang bervariasi dari 112.91 mm sampai dengan 190.70 mm. Grafik tersebut diperoleh dari pengolahan data yang berasal dari hasil parameter output alat akuisisi data setelah melakukan uji tumbuk pada tabung dalam bentuk *force* terhadap *displacement*. Dapat diamati pada gambar bahwa harga *force* dari hasil uji tumbuk tabung untuk setiap kenaikan keliling tabung tidak konsisten. Hal tersebut dapat diamati pada tabung dengan keliling 139.20 mm harga *force* yang dibutuhkan untuk setiap perpindahan tabung lebih besar dari pada tabung dengan keliling mulai dari 157.60 mm hingga 179.50 mm.

Gambar 5.5, menunjukkan grafik P_m (*mean crushing force*) dari tabung segi-empat dengan keliling yang bervariasi dari 112.91 mm sampai dengan 190.70 mm. Harga P_m yang dihasilkan untuk setiap perpindahan merupakan harga rata-rata dari *instantaneous force* pada tabung segi-empat. Harga P_m yang digunakan untuk perbandingan pada setiap kelilingnya merupakan harga dari *displacement* akhir tabung, karena memiliki nilai yang lebih konvergen [6]. Pada gambar dapat diamati harga P_m tidak konsisten terhadap kenaikan keliling tabung. Hal tersebut merupakan pengaruh dari *instantaneous force* yang terdapat pada gambar 5.4 dimana besar gaya yang dihasilkan tidak konsisten terhadap kenaikan kelilingnya.

Pengolahan data secara detail untuk memperoleh grafik *instantaneous force* dan *mean crushing force* dijelaskan lebih rinci pada lampiran A-3.



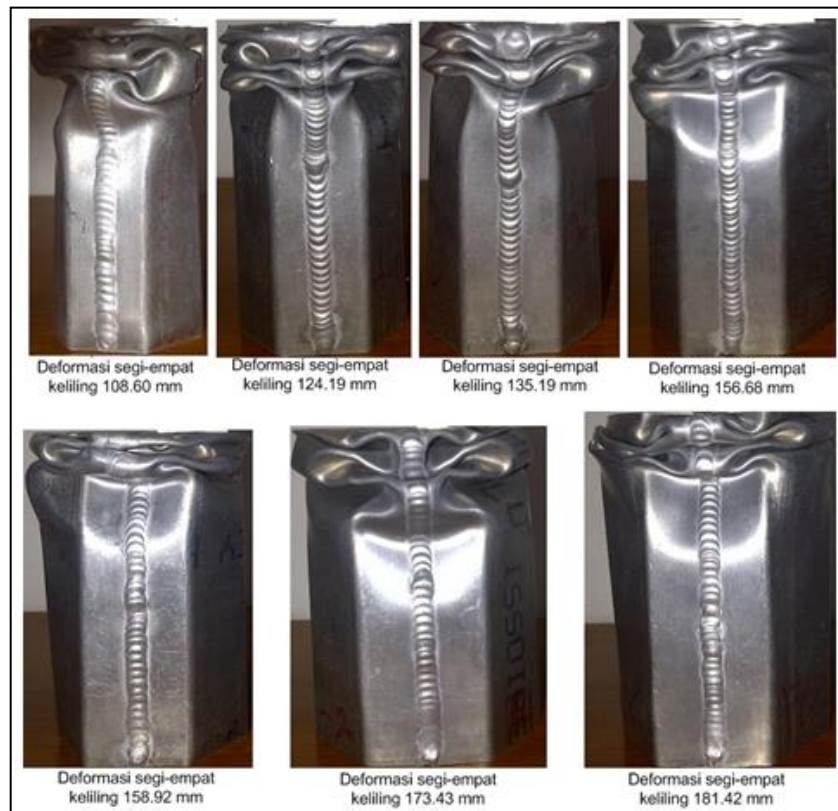
Gambar 5.4 Grafik *instantaneous force* untuk tabung segi-empat dengan keliling yang bervariasi



Gambar 5.5 Grafik *mean crushing force* untuk tabung segi-empat dengan keliling yang bervariasi

5.2.2 Hasil eksperimen tabung segi-enam

Gambar 5.6, menunjukkan hasil eksperimen pada tabung segi-enam dengan keliling yang bervariasi selama selang waktu ± 38 ms. Besarnya perpindahan total tabung dapat ditentukan dari selisih panjang awal dan panjang akhir tabung. Pengukuran perpindahan total tabung dilakukan sama seperti pengukuran perpindahan total tabung segi-empat. Hasil panjang akhir tabung terdapat pada lampiran A-7.



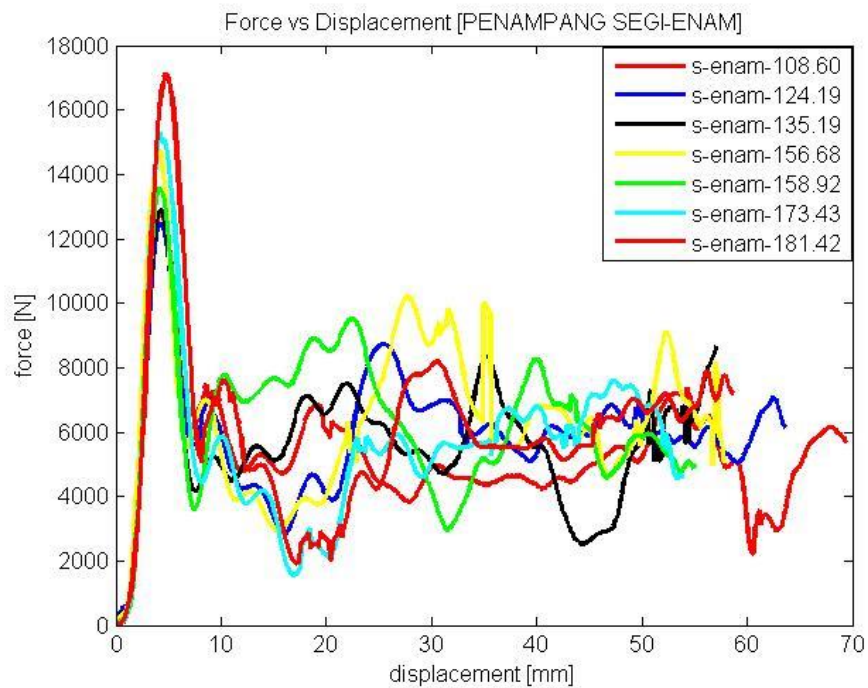
Gambar 5.6 Hasil uji tumbuk tabung berpenampang segi-enam

Tabel 5.4, menunjukkan harga perpindahan total tabung segi-enam dengan keliling yang bervariasi dari 108.60 mm sampai dengan 181.42 mm. Dapat diamati bahwa untuk tabung dengan keliling yang meningkat dari 108.60 mm hingga 173.43 mm perpindahan total tabung cenderung makin kecil. Namun untuk tabung dengan keliling 181.42 mm harga perpindahan total tabung lebih besar dibandingkan tabung dengan keliling 173.43 mm. Hal tersebut dikarenakan untuk tabung dengan keliling 181.42 mm kecepatan awal tumbukan lebih besar

dibandingkan dengan kecepatan awal tumbukan tabung dengan keliling 108.60 mm hingga 173.43 mm yang hampir sama besarnya.

Tabel 5.4 Data perpindahan total tabung berpenampang segi-enam

Penampang	Keliling [mm]	Kecepatan [m/s]	Perpindahan total [mm]
Segi-enam	108.60	4.97	69.30
	124.19	4.94	63.64
	135.19	4.86	57.10
	155.68	4.98	57.80
	158.92	5.07	55.10
	173.43	5.03	53.84
	181.42	5.20	58.60

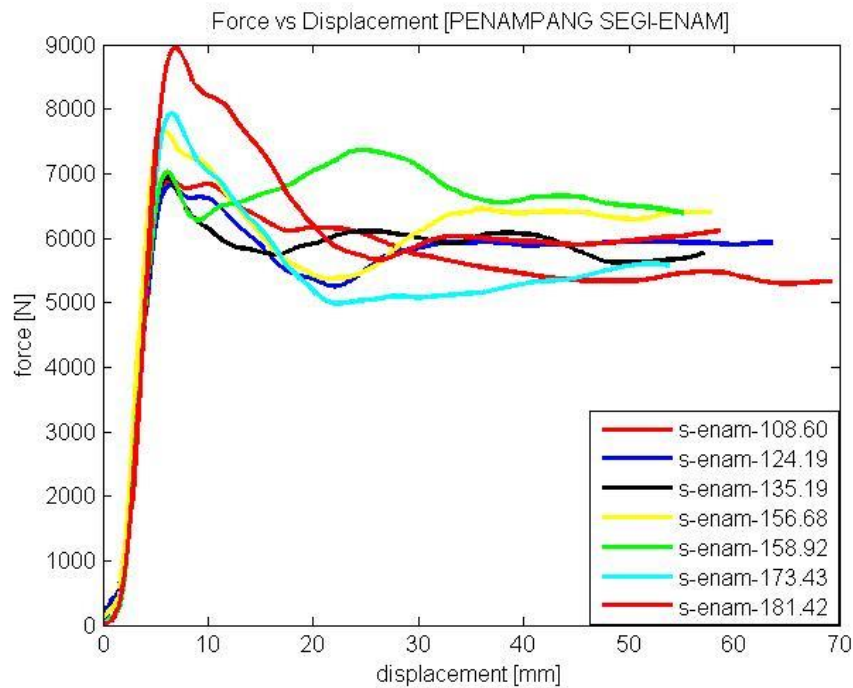


Gambar 5.7 Grafik *instantaneous force* untuk tabung segi-enam dengan keliling yang bervariasi

Gambar 5.7, menunjukkan grafik *instantaneous force* pada tabung segi-enam dengan keliling yang bervariasi dari 108.60 mm sampai dengan 181.42 mm. Dapat diamati pada gambar bahwa harga *force* yang dibutuhkan untuk setiap

perpindahan tabung tidak konsisten terhadap kenaikan keliling tabung. Hal tersebut dapat diamati pada tabung dengan keliling 156.68 mm harga *force* yang dibutuhkan untuk setiap perpindahan tabung lebih besar dari pada tabung dengan keliling mulai dari 158.92 mm hingga 181.42 mm .

Gambar 5.8 , menunjukkan grafik P_m (*mean crushing force*) dari tabung segi-enam dengan keliling yang bervariasi dari 108.60 mm sampai dengan 181.42 mm . Harga P_m yang dihasilkan untuk setiap perpindahan merupakan harga rata-rata dari *instantaneous force* tabung. Pada gambar dapat diamati harga P_m tidak konsisten terhadap kenaikan keliling tabung. Hal tersebut merupakan pengaruh dari *instantaneous force* yang ditunjukkan pada gambar 5.7 juga tidak konsisten terhadap kenaikan kelilingnya.

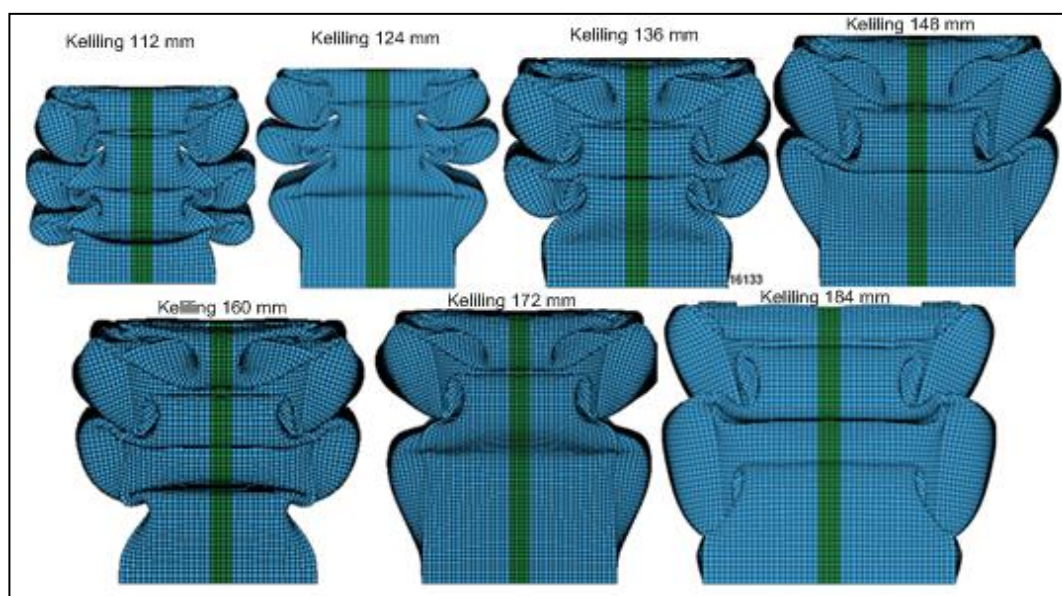


Gambar 5.8 Grafik *mean crushing force* untuk tabung segi-enam dengan keliling yang bervariasi

5.2.3 Hasil numerik tabung segi-empat

Parameter-parameter yang digunakan dalam eksperimen uji tumbuk pada tabung dipakai dalam simulasi numerik dengan menggunakan metode elemen hingga. Hal tersebut dilakukan agar hasil dari simulasi numerik dapat

dibandingkan dengan hasil eksperimen. Namun pada pemodelan simulasi numerik ada beberapa asumsi yang digunakan yaitu geometri tabung diasumsikan sempurna baik panjang sisinya maupun penampangnya serta material pada tabung tidak *fracture* saat beban tumbukan diberikan. Pada simulasi numerik keliling tabung bervariasi mulai dari 112 mm sampai dengan 184 mm. Gambar 5.9, menunjukkan hasil simulasi uji tumbuk tabung berpenampang segi-empat. Parameter output yang dihasilkan dari simulasi uji tumbuk pada tabung dalam bentuk *force* terhadap *displacement*.



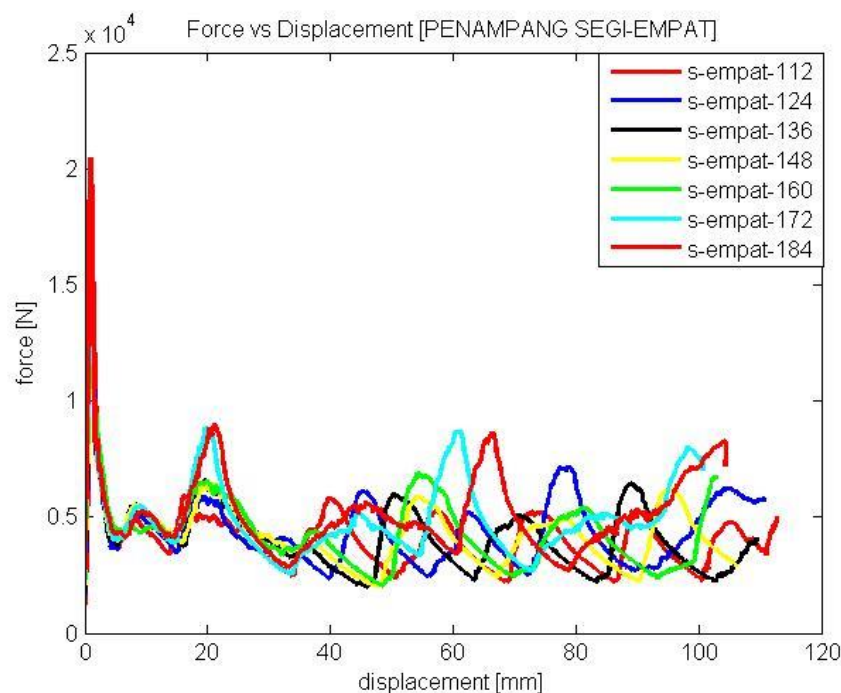
Gambar 5.9 Hasil simulasi uji tumbuk tabung berpenampang segi-empat

Pada tabel 5.5 , ditunjukkan perpindahan total tabung segi-empat dengan keliling yang bervariasi dari 112 mm sampai dengan 184 mm. Dapat diamati bahwa untuk tabung dengan keliling yang meningkat dari 112 mm hingga 172 mm perpindahan total tabung cenderung makin kecil. Namun untuk tabung dengan keliling 184 mm harga perpindahan total tabung lebih besar dibandingkan tabung dengan keliling 172 mm. Hal tersebut dikarenakan untuk tabung dengan keliling 184 mm kecepatan awal tumbukan lebih besar dibandingkan dengan kecepatan awal tumbukan tabung dengan keliling 112 mm hingga 172 mm yang hampir sama besarnya.

Tabel 5.5 Data perpindahan total tabung berpenampang segi-empat

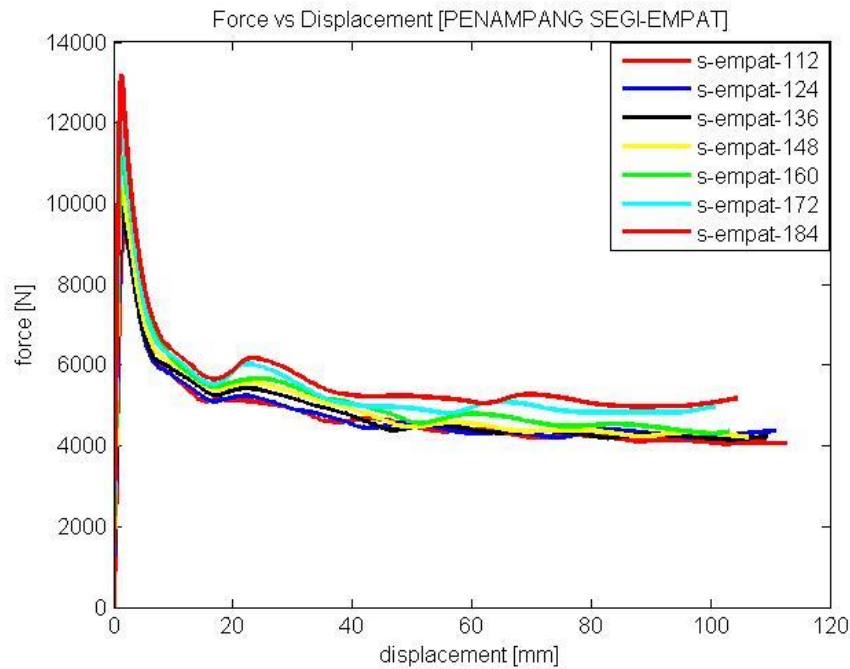
Penampang	Keliling [mm]	Kecepatan [m/s]	Perpindahan [mm]
Segi-empat	112	5.02	112.84
	124	5.09	110.88
	136	5.06	109.60
	148	5.01	105.24
	160	4.94	102.99
	172	5.04	100.69
	184	5.23	104.32

Pada gambar 5.10, ditunjukkan grafik *instantaneous force* pada tabung segi-empat dengan keliling yang bervariasi dari 112 mm sampai 184 mm. Dapat diamati pada gambar bahwa harga *force* tidak konsisten untuk setiap kenaikan keliling. Hal tersebut dapat dilihat untuk keliling tabung 124 mm harga *force* yang dihasilkan untuk setiap perpindahan tabung lebih besar dari pada tabung dengan keliling mulai dari 136 mm sampai dengan 160 mm.



Gambar 5.10 Grafik *instantaneous force* untuk tabung segi-empat dengan keliling yang bervariasi

Pada gambar 5.11, ditunjukkan grafik P_m (*mean crushing force*) dari tabung segi-empat dengan keliling yang bervariasi dari 112 mm sampai dengan 184 mm. Dapat diamati pada gambar bahwa harga P_m tidak konsisten untuk setiap kenaikan keliling tabung.

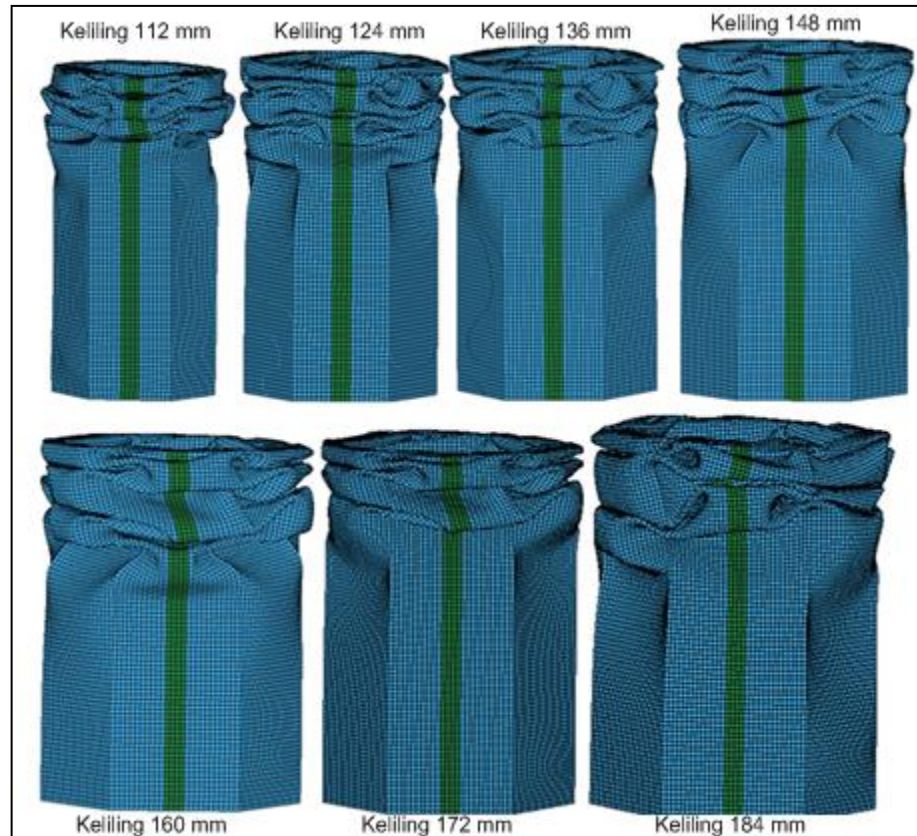


Gambar 5.11 Grafik *mean crushing force* untuk tabung segi-empat dengan keliling yang bervariasi

5.2.4 Hasil numerik tabung segi-enam

Simulasi numerik tabung segi-enam dihasilkan dari parameter-parameter yang digunakan pada eksperimen uji tumbuk tabung segi-enam. Hal tersebut sama seperti yang dilakukan pada pemodelan numerik tabung segi-empat bagian 5.2.3, agar hasil pemodelan numerik dan hasil eksperimen uji tumbuk dapat dibandingkan.

Pada gambar 5.12, ditunjukkan hasil simulasi uji tumbuk tabung berpenampang segi-enam. Parameter output yang dihasilkan dari simulasi uji tumbuk pada tabung segi-enam sama dengan parameter output yang dihasilkan dari simulasi uji tumbuk tabung segi-empat.

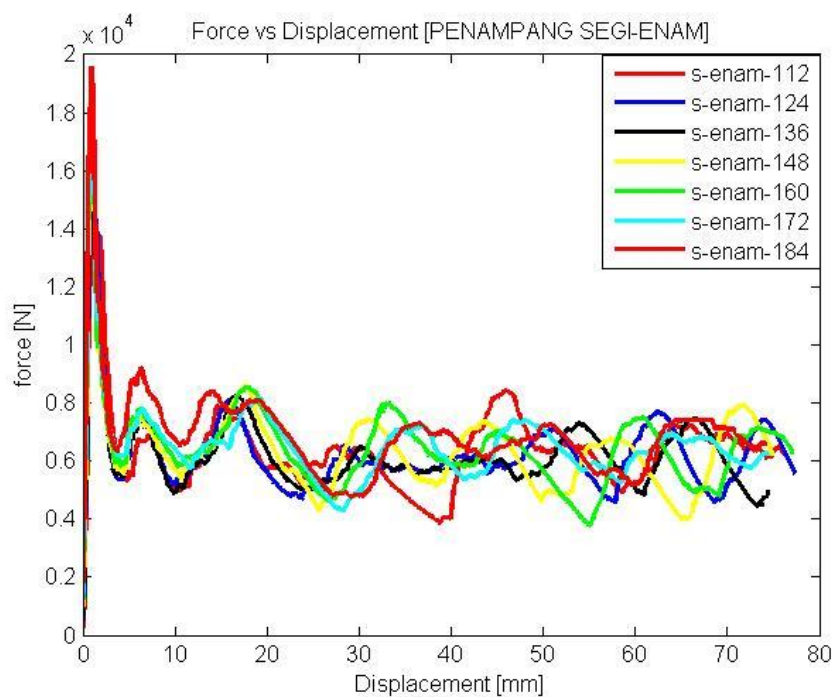


Gambar 5.12 Hasil simulasi tabung berpenampang segi-enam dengan keliling yang berbeda

Pada tabel 5.6 , ditunjukkan perpindahan total tabung segi-enam dengan keliling yang bervariasi dari 112 *mm* sampai dengan 184 *mm*. Dapat diamati bahwa untuk tabung dengan keliling yang meningkat dari 112 *mm* hingga 172 *mm* perpindahan total tabung cenderung makin kecil. Namun untuk tabung dengan keliling 184 *mm* harga perpindahan total tabung lebih besar dibandingkan tabung dengan keliling 172 *mm*. Hal tersebut dikarenakan untuk tabung dengan keliling 184 *mm* kecepatan awal tumbukan lebih besar dibandingkan dengan kecepatan awal tumbukan tabung dengan keliling 112 *mm* hingga 172 *mm* yang hampir sama besarnya.

Tabel 5.6 Data perpindahan total tabung berpenampang segi-enam

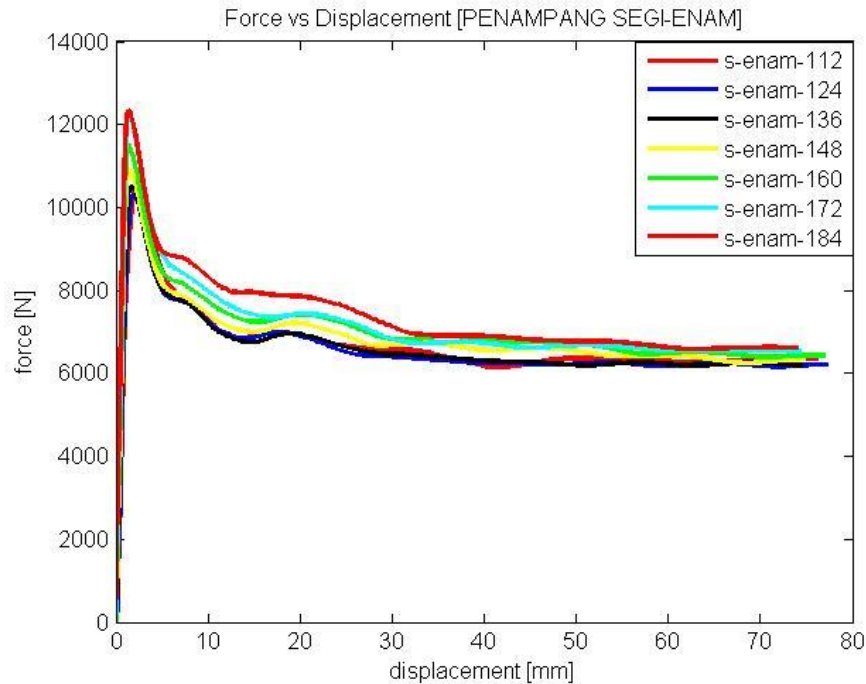
Penampang	Keliling [mm]	Kecepatan [m/s]	Perpindahan [mm]
Segi-enam	112	4.97	75.18
	124	4.94	75.33
	136	4.86	74.52
	148	4.98	74.07
	160	5.07	73.23
	172	5.03	72.37
	184	5.20	73.93



Gambar 5.13 Grafik *instantaneous force* untuk tabung segi-enam dengan keliling yang bervariasi

Pada gambar 5.13, ditunjukkan grafik *instantaneous force* pada tabung segi-enam dengan keliling yang bervariasi dari 112 mm sampai 184 mm. Dapat diamati pada gambar bahwa harga *force* tidak konsisten untuk setiap kenaikan keliling. Hal tersebut dapat dilihat untuk keliling tabung 112 mm harga *force* yang dihasilkan untuk setiap perpindahan tabung lebih besar dari pada tabung dengan keliling mulai dari 124 mm sampai dengan 148 mm.

Pada gambar 5.11, ditunjukkan grafik P_m (*mean crushing force*) dari tabung segi-enam dengan keliling yang bervariasi dari 112 mm sampai dengan 184 mm. Dapat diamati pada gambar bahwa harga P_m tidak konsisten untuk setiap kenaikan keliling tabung.



Gambar 5.14 Grafik *mean crushing force* untuk tabung segi-enam dengan keliling yang bervariasi

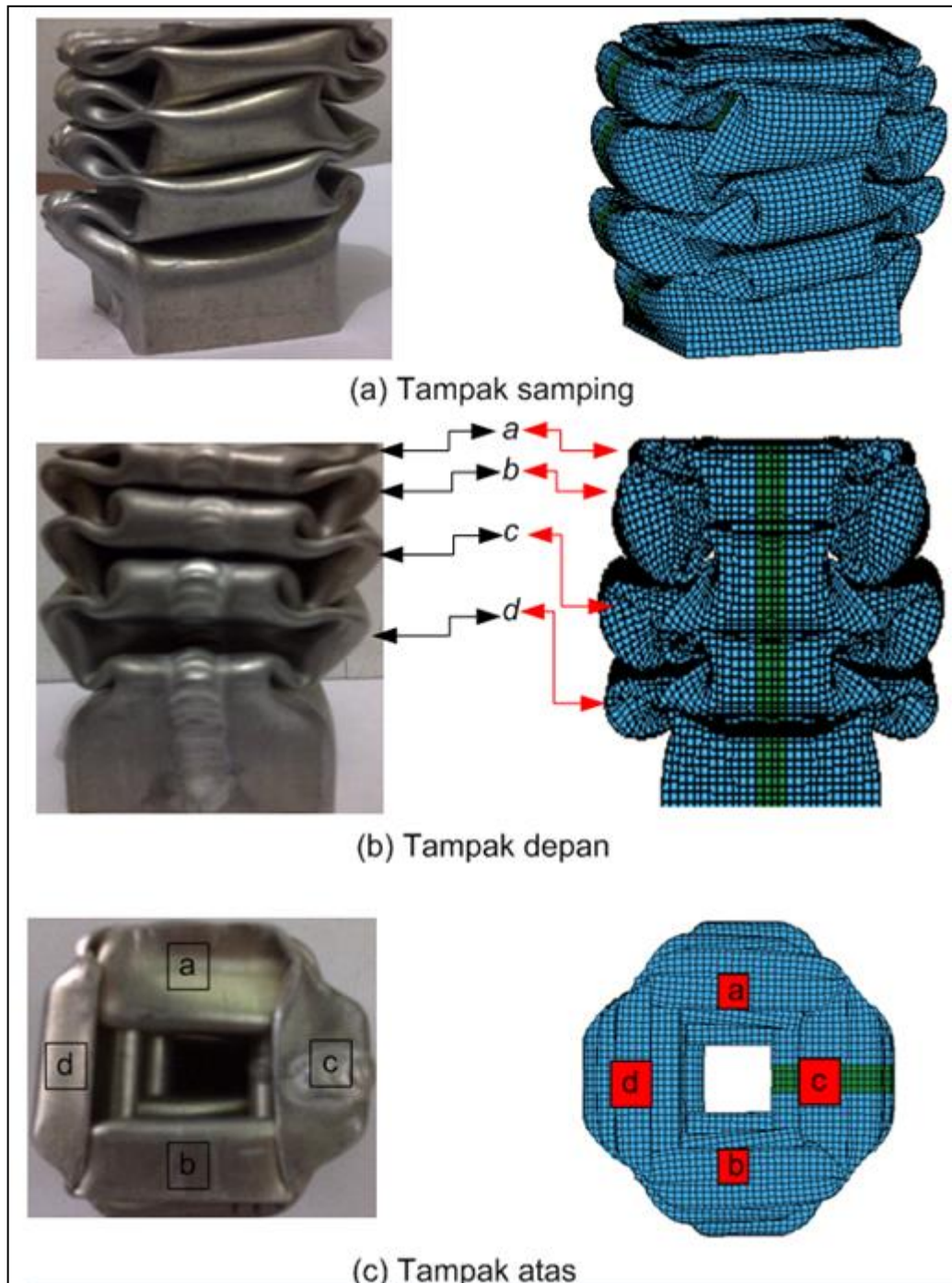
5.3 Perbandingan pola lipat tabung segi-empat dan segi enam dari hasil metode numerik dan metode eksperimen

Pada bagian ini, hal-hal yang dijelaskan terdiri dari perbandingan pola lipat dan jumlah lipatan tabung hasil uji tumbuk antara metode numerik dan metode eksperimen. Perbandingan juga dilakukan terhadap grafik *instantaneous force* pada tabung segi-empat yang diperoleh dari parameter output antara hasil metode numerik dan hasil metode eksperimen. Untuk tabung segi-enam juga dilakukan perbandingan grafik *instantaneous force* yang sama.

5.3.1 Tabung segi-empat

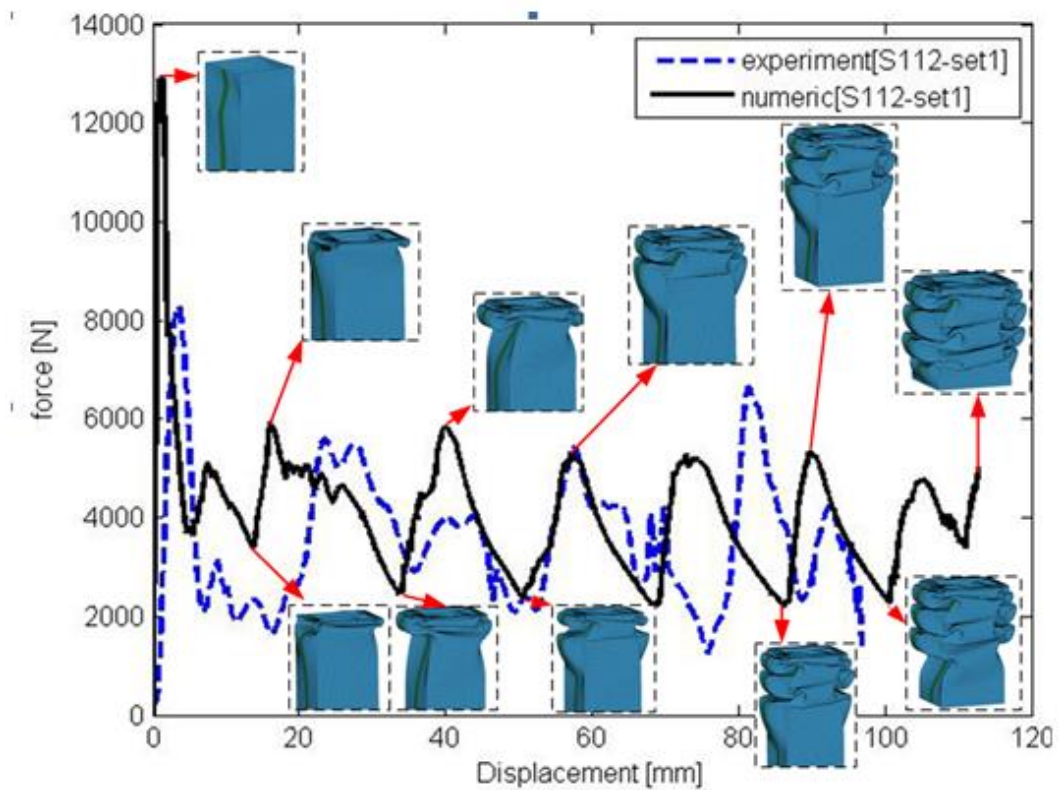
Pada gambar 5.15, ditunjukkan perbandingan pola deformasi tabung segi-empat hasil dari uji tumbuk antara metode eksperimen dan metode numerik.

Perbandingan dilakukan dengan keliling tabung yang bervariasi yaitu 112.09 mm untuk tabung eksperimen dan 112 mm untuk tabung numerik, sedangkan kecepatan awal tumbukan tabung sama.



Gambar 5.15 Perbandingan pola deformasi tabung segi-empat dengan ukuran keliling yang hampir sama besar

Gambar 5.15 (a), menunjukkan bahwa pola lipatan dan jumlah lipatan tabung dari hasil metode eksperimen dan metode numerik memiliki hasil yang mirip. Gambar 5.15 (b), menunjukkan jumlah lipatan yang sama yaitu 4 lipatan (*lobe*) (lipatan pertama sampai terakhir ditandai dengan huruf *a,b,c,d*). Gambar 5.15 (c), menunjukkan mekanisme lipatan yang terjadi pada tabung segi-empat. Modus lipatan membentuk modus simetri pada bidang *c,d* dan *a,b*. (*symmetric mode*) [16]. Modus deformasi yang terjadi pada hasil eksperimen dan hasil numerik sama dengan teori yang dikemukakan oleh [16] dimana modus deformasi simetrik terjadi apabila $b/t \geq 17.5$. Ketika tumbukan terjadi dua sisi tabung melipat kearah luar (sisi a dan b) dan dua lainnya melipat kearah dalam (sisi c dan d), hal ini terjadi pada hasil tabung eksperimen dan tabung numerik.



Gambar 5.16 Perbandingan kurva *force-displacement* hasil numerik dan hasil eksperimen dengan ukuran keliling tabung yang hampir sama besar

Gambar 5.16, menunjukkan Perbandingan kurva *force-displacement* hasil numerik dan hasil eksperimen pada tabung segi-empat keliling tabung yang hampir sama besar. Deformasi elastoplastis pada tabung pertama kali terjadi pada

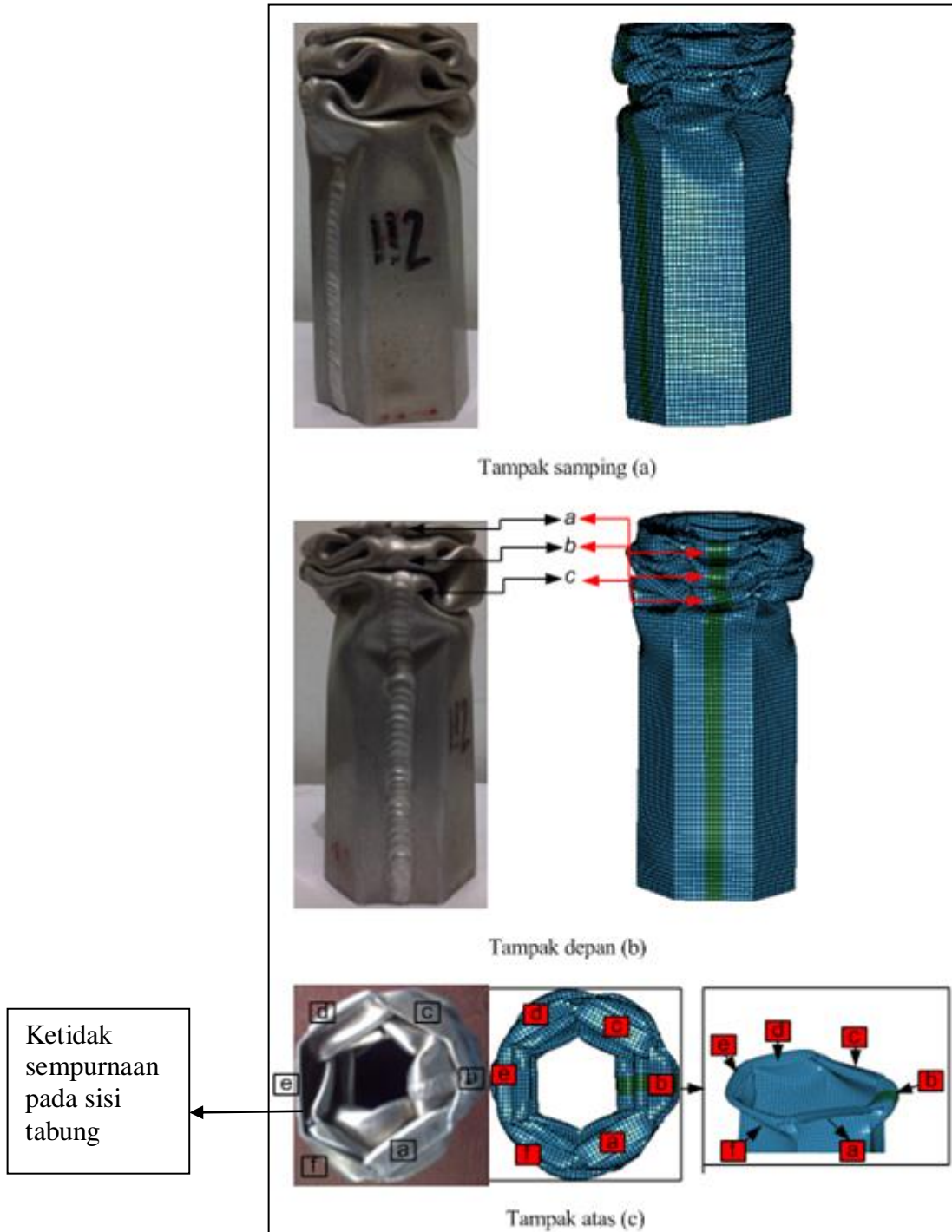
saat harga gaya (*force*) yang meningkat secara signifikan, sampai dengan sisi tabung mengalami tekuk. Gaya akan turun secara drastis menuju ke titik lokal paling minimum, dimana lipatan pertama pada tabung sepenuhnya terbentuk. Peningkatan harga gaya merupakan penanda akan munculnya lipatan kedua yang dapat diamati setelah lipatan pertama selesai terbentuk. Lalu, penurunan harga gaya terjadi kembali mengindikasikan lipatan kedua sepenuhnya terbentuk. Proses ini akan terus berulang sampai dengan seluruh proses lipatan yang berulang telah selesai dan semua energi akibat tumbukan telah diserap.

5.3.2 Tabung segi-enam

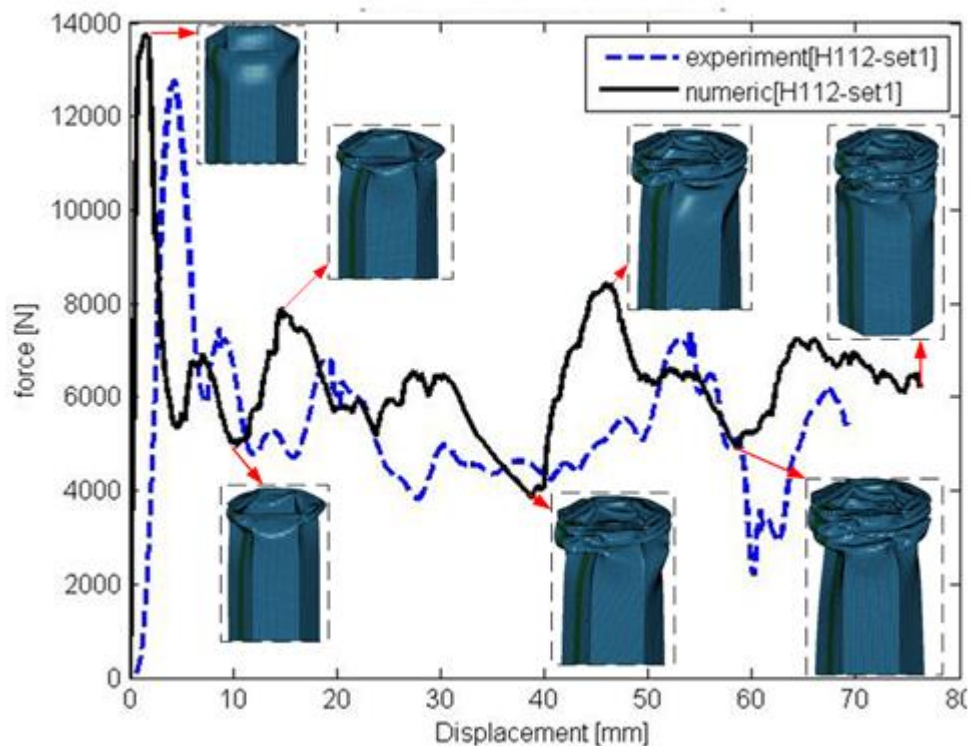
Gambar 5.17, menunjukkan perbandingan pola deformasi tabung segi-enam hasil dari uji tumbuk antara metode eksperimen dan metode numerik. Perbandingan dilakukan dengan keliling yang berbeda yaitu antara 108.60 mm pada tabung eksperimen dan 112 mm pada tabung numerik.

Gambar 5.17 (a), dari hasil metode eksperimen dan metode numerik memiliki hasil yang berbeda, hal tersebut akan dijelaskan pada gambar 5.17(c). Dari gambar 5.17 (b), dapat dilihat bahwa jumlah lipatan tabung sama yaitu mempunyai 3 lipatan (*lobe*) (lipatan pertama sampai terakhir ditandai dengan huruf *a,b,c*). Gambar 5.17 (c) , ditunjukkan mekanisme lipatan yang terjadi pada tabung segi-enam. Modus lipatan membentuk modus simetrik terhadap bidang *c,f* dan *a,d* pada hasil eksperimen dan pada hasil numerik lipatan membentuk modus simetrik pada bidang *b,e* . Pada permukaan sisi tabung hasil eksperimen, ada tiga sisi yang melipat kedalam (sisi *b, c, f*) , 1 sisi melipat keluar (sisi *a*) dan dua sisi lainnya masih tegak (tidak melipat kedalam atau keluar (sisi *d,e*). Penyebab dua sisi ini masih tegak (tidak melipat) dikarenakan terdapat ketidaksempurnaan (*imperfection*) pada sisi tabung, sehingga daerah yang memiliki ketidaksempurnaan (*imperfection*) ini akan lebih dulu *fracture* sebelum permukaan tabung. Sedangkan pada sisi tabung hasil numerik, 4 sisi nya melipat kedalam (sisi *b,d,e,f*) dan 2 lainnya melipat keluar (sisi *a,c*), tidak memiliki sisi yang tegak (tidak melipat), karena pada numerik diasumsikan kondisi tabung bersifat homogen (tidak memiliki ketidaksempurnaan pada tabung). Sehingga dengan adanya ketidaksempurnaan yang terdapat pada sisi tabung tersebut

mengakibatkan pola lipatan dari tabung hasil eksperimen tidak sama dengan hasil numerik.



Gambar 5.17 Perbandingan pola deformasi antara hasil eksperimen dan hasil numerik untuk tabung segi-enam dengan ukuran keliling yang hampir sama besar.



Gambar 5.18 Perbandingan kurva *load-displacement* antara hasil numerik dan hasil eksperimen pada tabung segi-enam dengan ukuran keliling yang hampir sama besar

Gambar 5.18 , menunjukkan proses pelipatan tabung segi-enam , dimana rangkaian prosesnya sama dengan tabung segi-empat namun gaya yang dibutuhkan untuk membuat satu lipatan pada tabung segi-enam lebih besar dari pada tabung segi-empat.

5.4 Perbandingan harga P_m tabung segi-empat dan tabung segi-enam dari hasil metode analitik, metode numerik dan metode eksperimen.

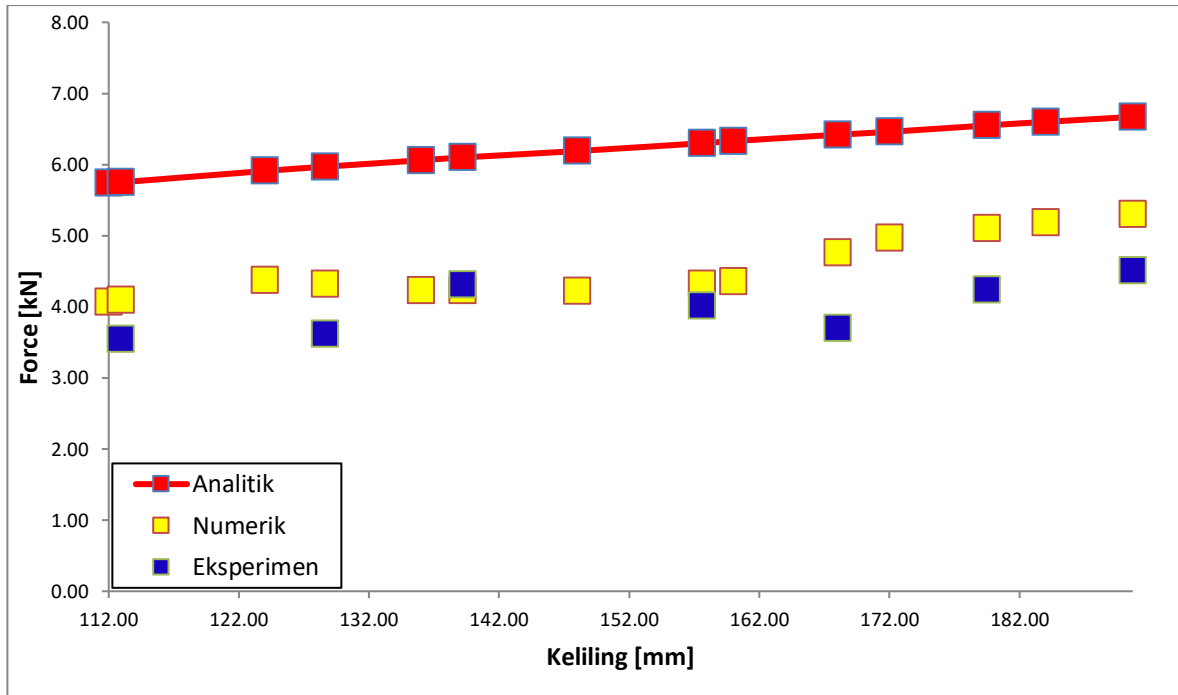
Pada bagian ini, perbandingan harga P_m tabung untuk metode analitik, numerik dan eksperimen dilakukan dengan menggunakan grafik dan tabel . Untuk metode eksperimen, keliling yang digunakan untuk perbandingan harga P_m tabung segi-empat dan segi-enam berbeda dari metode analitik dan numerik, hal tersebut terjadi karena kesalahan proses produksi tabung seperti yang telah dijelaskan pada bagian 5.1.1 (detil geometri penampang tabung segi-empat). Pada metode eksperimen, keliling yang digunakan dalam pengujian eksperimen mulai

dari 112.91 *mm* sampai dengan 190.70 *mm* untuk tabung segi-empat (tertera pada tabel 5.1) dan 108.60 *mm* sampai dengan 181.42 *mm* untuk tabung segi-enam (tertera pada tabel 5.2). Sedangkan untuk metode analitik dan metode numerik keliling tabung yang digunakan untuk perbandingan tabung segi-empat dan tabung segi-enam adalah sama. Besar keliling tabung dimulai dari 112 *mm* sampai dengan 184 *mm* (tabel 5.5 dan tabel 5.6). Oleh karena itu untuk membandingkan harga P_m dengan keliling yang sama, maka untuk harga P_m hasil analitik dan numerik perlu dilakukan interpolasi dan ekstrapolasi data harga P_m berdasarkan keliling tabung yang digunakan pada hasil eksperimen. Selanjutnya, harga P_m tabung segi-empat dan tabung segi-enam juga dibandingkan antara hasil metode analitik, hasil metode numerik dan hasil metode eksperimen, hal tersebut dilakukan untuk mengetahui pengaruh penampang terhadap perubahan harga P_m .

5.4.1 Tabung segi-empat

Gambar 5.19, menunjukkan grafik perbandingan harga P_m dengan keliling yang bervariasi. Untuk harga P_m hasil analitik dan numerik digunakan interpolasi dan ekstrapolasi data harga P_m berdasarkan keliling tabung yang digunakan pada hasil eksperimen, hal tersebut digunakan untuk mengetahui perbedaan harga P_m yang dihasilkan pada setiap metode yang digunakan.

Pada metode analitik yang terdapat pada Gambar 5.19, secara kualitatif harga P_m tabung paling tinggi dibandingkan dengan metode yang lain. Setiap pertambahan keliling tabung selalu diikuti dengan kenaikan harga P_m , hal tersebut dikarenakan pada metode analitik geometri tabung diasumsikan sempurna dan harga *strain hardening* dari material tabung tidak dimasukkan agar perhitungan mudah dilakukan. Harga *strain hardening* didapatkan dari hasil uji tarik material tabung [lampiran A-1]. Pada metode numerik geometri tabung juga diasumsikan sempurna, namun harga *strain hardening* dimasukkan kedalam parameter input numerik agar hasil simulasi yang diperoleh mendekati hasil kondisi sebenarnya. Sedangkan pada metode eksperimen, panjang sisi tabung tidak sama pada setiap sisinya dan tabung juga memiliki ketidaksempurnaan pada penampangnya seperti yang telah dijelaskan pada bagian 5.1.1 (detil geometri penampang tabung segi-empat), sehingga harga P_m paling rendah dibandingkan hasil metode lainnya.

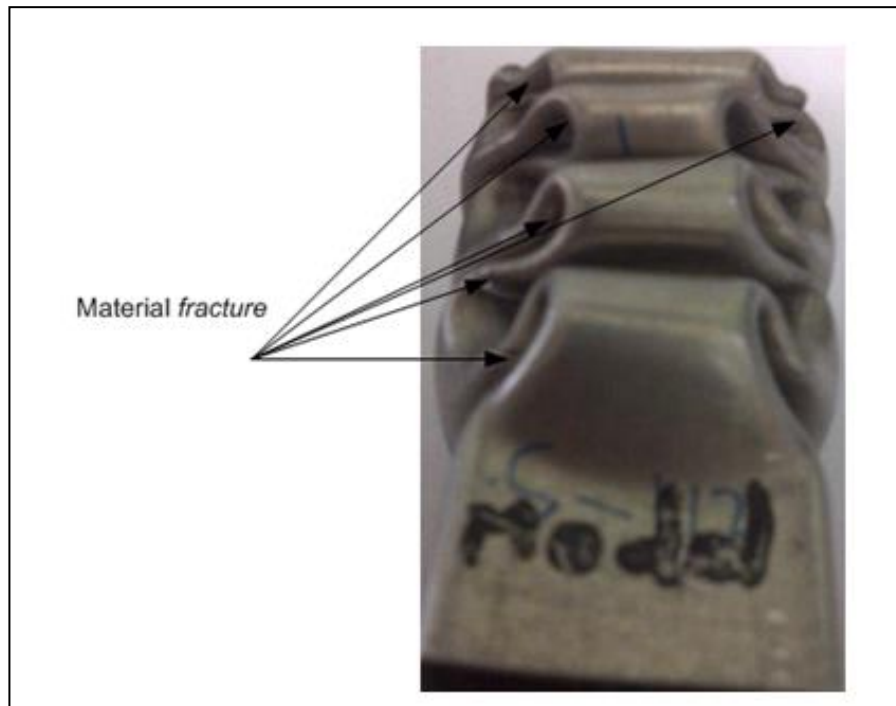


Gambar 5.19 Grafik perbandingan harga P_m dengan keliling yang bervariasi menggunakan metode analitik, metode numerik dan metode eksperimen

Pada metode numerik yang terdapat pada gambar 5.19 diamati bahwa harga P_m tiap keliling tabung selalu lebih rendah dibandingkan dengan harga P_m hasil metode analitik. Setiap pertambahan keliling untuk metode numerik menunjukkan kecenderungan kenaikan harga P_m .

Pada metode eksperimen yang terdapat juga pada gambar 5.19, diamati bahwa harga P_m tabung tidak konsisten terhadap pertambahan keliling. Besarnya harga P_m bergantung kepada geometri penampang yang dimiliki pada setiap tabung. Untuk keliling 139.20 mm kenaikan harga P_m paling tinggi terhadap pertambahan kelilingnya, hal tersebut dikarenakan pada keliling 139.20 mm memiliki penampang yang paling sempurna jika dibandingkan dengan penampang tabung lainnya, seperti yang dijelaskan pada bagian 5.1.1 (Detil geometri penampang tabung segi-empat). Adapun faktor lain yang menyebabkan harga P_m tabung eksperimen tidak konsisten terhadap pertambahan kelilingnya penyebabnya adalah *fracture* yang terdapat pada setiap tabung segi-empat, salah satunya dapat dilihat pada gambar 5.20.

Material *fracture* pada tabung terjadi karena beban tumbuk yang diberikan melebihi batas dari *ultimate strength* material tabung. *Fracture* ini terdapat pada bagian *hinge*/sekitar tekukan dimana deformasi plastis terbesar terjadi pada bagian tersebut. Semakin banyak material tabung yang mengalami *fracture* maka akan berpengaruh terhadap besarnya harga P_m yang dihasilkan.



Gambar 5.20 *Fracture* pada tabung segi-empat keliling 112.91 mm

Tabel 5.7, menunjukkan P_m (*mean crushing force*) dari hasil metode analitik, numerik dan eksperimen. Secara kuantitatif, Perbedaan P_m antara hasil analitik dengan P_m hasil numerik berkisar antara 25.85 % untuk tabung keliling 190.70 mm hingga 46.68 % untuk tabung keliling 148 mm, dengan perbedaan rata-rata untuk perbandingan 14 variasi keliling tabung sebesar 37.65 %. Perbedaan P_m antara hasil analitik dengan P_m hasil eksperimen berkisar antara 41.53 % untuk tabung keliling 139.20 mm hingga 73.51 % untuk tabung dengan keliling 168.02 mm dengan perbedaan rata-rata untuk perbandingan 7 variasi keliling tabung sebesar 57.41 %. Sedangkan perbedaan hasil numerik dan eksperimen berkisar antara -1.86 % untuk tabung keliling 139.20 mm hingga

28.65 % untuk tabung keliling 168.02 mm dengan perbedaan rata-rata sebesar 15.31 % .

Tabel 5.7 *Mean crushing force* dari hasil metode analitik, numerik dan eksperimen

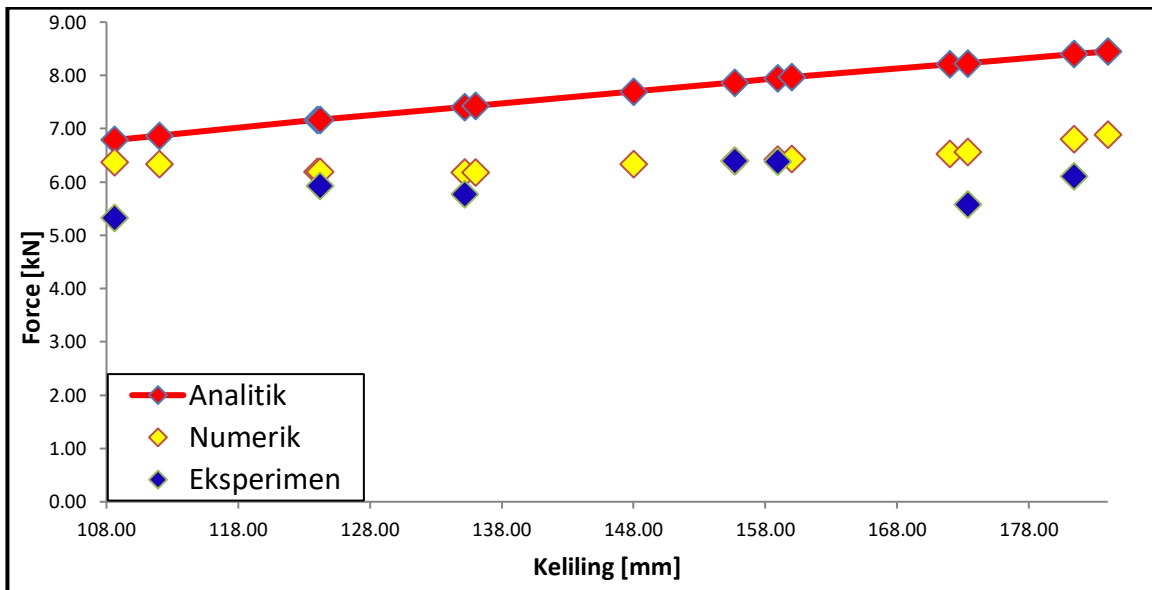
Penampang	Keliling	P_m (mean crushing force) [kN]			A-N [%]	A-E [%]	N-E [%]
		A	N	E			
Segi-empat	112.00	5.74	4.07	-	41.03		
	112.91	5.75	4.09	3.54	40.59	62.43	15.54
	124.00	5.91	4.37		35.24		
	128.64	5.97	4.32	3.62	38.19	64.92	19.34
	136.00	6.06	4.23	-	43.26		
	139.20	6.10	4.23	4.31	44.21	41.53	-1.86
	148.00	6.19	4.22	-	46.68		
	157.60	6.30	4.32	4.01	45.83	57.11	7.73
	160.00	6.33	4.35	-	45.52		
	168.02	6.42	4.76	3.70	34.87	73.51	28.65
	172.00	6.46	4.97	-	29.98		
	179.50	6.55	5.10	4.24	28.43	54.48	20.28
	184.00	6.60	5.18	-	27.41		
	190.70	6.67	5.30	4.51	25.85	47.89	17.52

Ket : A : Analitik, N : Numerik, E : Eksperimen

5.4.2 Tabung segi-enam

Gambar 5.21, menunjukkan grafik perbandingan P_m dengan keliling yang bervariasi. Untuk harga P_m hasil numerik dan analitik digunakan interpolasi dan ekstrapolasi data harga P_m berdasarkan keliling tabung yang digunakan pada hasil eksperimen, hal tersebut digunakan untuk mengetahui perbedaan harga P_m yang dihasilkan pada setiap metode yang digunakan. Harga P_m dari metode analitik dan numerik menunjukkan kecenderungan semakin meningkat terhadap pertambahan keliling. Sedangkan untuk eksperimen, harga P_m tidak konsisten terhadap pertambahan kelilingnya. Besarnya harga P_m bergantung kepada geometri penampang yang dimiliki pada setiap tabung. Pada tabung dengan keliling 155.68 mm kenaikan harga P_m paling tinggi terhadap pertambahan kelilingnya, hal

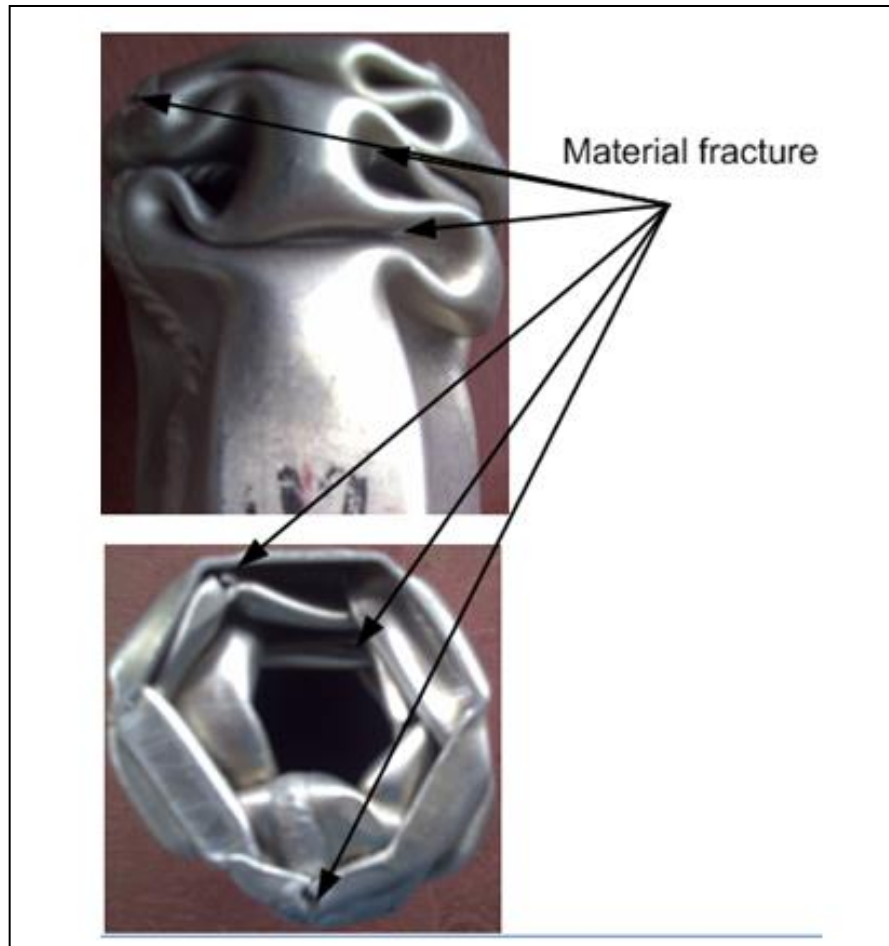
tersebut dikarenakan pada tabung dengan keliling 155.68 mm memiliki penampang tabung yang paling sempurna diantara penampang tabung dengan keliling lainnya. Adapun faktor lain yang menyebabkan harga P_m tabung eksperimen tidak konsisten terhadap pertambahan kelilingnya penyebabnya adalah *fracture* yang terdapat pada setiap tabung segi-enam. Gambar 5.22 menunjukkan bukti hasil dokumentasi *material fracture* yang terjadi pada salah satu tabung segi-enam akibat tumbukan.



Gambar 5.21. Grafik perbandingan harga P_m dengan keliling yang bervariasi hasil dari metode analitik, metode numerik dan metode eksperimen

Tabel 5.8, menunjukkan P_m (*mean crushing force*) dari hasil metode analitik, numerik dan eksperimen. Secara kuantitatif, Harga P_m hasil analitik paling besar dibandingkan dengan hasil numerik dan eksperimen. Perbedaan P_m antara hasil analitik dengan P_m hasil numerik berkisar antara 6.59 % untuk tabung keliling 108.60 mm hingga 25.73 % untuk tabung keliling 172 mm, dengan perbedaan rata-rata untuk 14 variasi keliling tabung sebesar 19.68 %. Perbedaan hasil P_m analitik dengan hasil P_m eksperimen berkisar antara 20.91 % untuk tabung keliling 124.19 mm hingga 47.49 % untuk tabung dengan keliling 173.34 mm dengan perbedaan rata-rata untuk 7 variasi keliling sebesar 29.87 %. Sedangkan perbedaan P_m antara hasil numerik dengan P_m hasil eksperimen

berkisar antara 0 % untuk tabung keliling 155.68 mm hingga 19.51 % untuk tabung keliling 108.60 mm , dengan perbedaan rata-rata untuk 7 variasi keliling tabung sebesar 8.69 %



Gambar 5.22 Kegagalan material pada tabung segi-enam keliling 108.60 mm

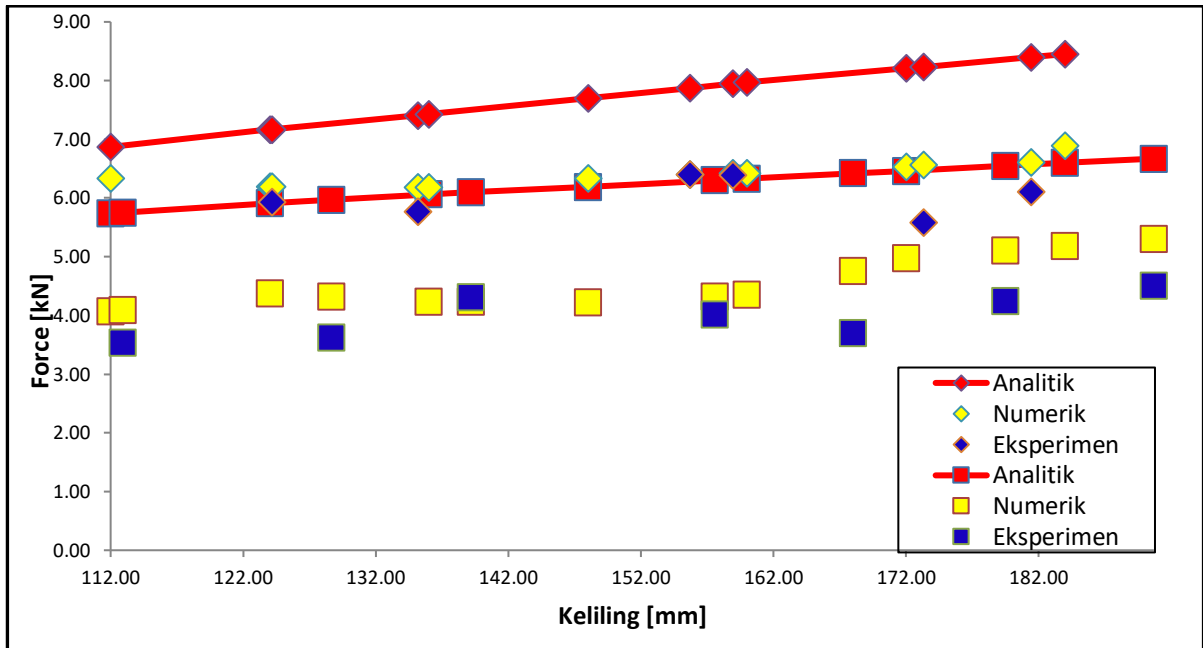
Tabel 5.8 Perbandingan persentase harga P_m antara metode eksperimen terhadap metode numerik dan metode analitik

Penampang	Keliling [mm]	P_m (mean crushing force)[kN]			A-N [%]	A-E [%]	N-E [%]
		Analitik	Numerik	Eksperimen			
Segi-enam	108.60	6.79	6.37	5.33	6.59	27.39	19.51
	112.00	6.87	6.34	-	8.36		
	124.00	7.17	6.20	-	15.65		
	124.19	7.17	6.20	5.93	15.65	20.91	4.55
	135.19	7.41	6.18	5.77	19.90	28.42	7.11
	136.00	7.43	6.18	-	20.23		
	148.00	7.70	6.34	-	21.45		
	155.68	7.87	6.40	6.40	22.97	22.97	0.00
	158.92	7.95	6.42	6.39	23.83	24.41	0.47
	160.00	7.97	6.43	-	23.95		
	172.00	8.21	6.53	-	25.73		
	173.34	8.23	6.57	5.58	25.27	47.49	17.74
	181.42	8.40	6.81	6.11	27.08	37.48	11.46
	184.00	8.45	6.89	-	22.64		

Ket : A : Analitik, N : Numerik, E : Eksperimen

5.5 Perbandingan harga P_m antara tabung segi-empat dan segi-enam dengan menggunakan metode analitik, metode numerik, dan metode eksperimen.

Gambar 5.23, menunjukkan grafik perbandingan harga P_m pada tabung segi-empat dan segi-enam dari hasil metode analitik, metode numerik dan metode eksperimen. Untuk hasil analitik, secara kualitatif tabung segi-enam memiliki harga P_m yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan harga P_m tabung segi-empat. Perbandingan harga P_m tabung segi-enam dan segi-empat dalam hasil analitik dilakukan dengan kecepatan awal tumbukan tabung yang bervariasi, mulai dari 4.86 m/s sampai dengan 5.23 m/s. Perbedaan harga P_m terbesar yaitu sebesar 27.27 % sedangkan yang terkecil sebesar 18.29 % dengan rata-rata perbedaannya sebesar 23.50 %.



Gambar 5.23 Grafik perbandingan harga P_m pada tabung segi-empat dan segi-enam dengan metode analitik, metode numerik dan metode eksperimen

Untuk hasil metode numerik sama dengan metode analitik, untuk metode numerik secara kualitatif harga P_m tabung segi-enam lebih tinggi jika dibandingkan dengan tabung segi-empat. Perbandingan harga P_m tabung segi-enam dan segi-empat dalam metode numerik juga dilakukan dengan kecepatan awal tumbukan tabung yang bervariasi, dari 4.86 m/s sampai dengan 5.23 m/s. Perbedaan harga P_m terbesar yaitu sebesar 56.51 % sedangkan perbedaan harga P_m terkecil sebesar 28.82 % dengan rata-rata perbedaannya sebesar 42.28%.

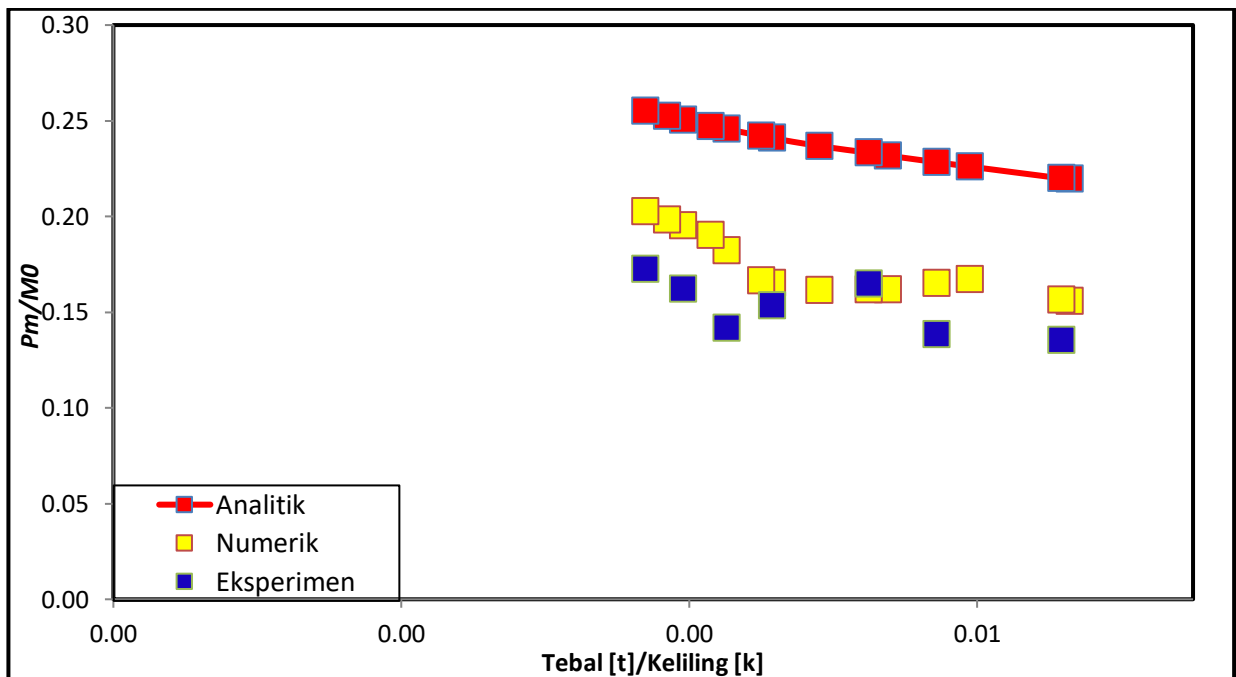
Untuk hasil metode eksperimen kecenderungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.23 sama dengan hasil analitik dan hasil numerik. Tabung segi-enam memiliki nilai P_m yang paling tinggi dari pada tabung segi-empat. Namun untuk perbedaan persentase antara tabung segi-enam dan segi-empat tidak dapat dilakukan karena keliling tabung yang digunakan berbeda.

5.6 Parameter non-dimensional P_m/M_o – tebal/keliling untuk penampang segi-empat dan segi-enam

Parameter non dimensional P_m/M_o – tebal [t] /keliling [k] digunakan untuk membandingkan hasil P_m yang didapat dengan mengabaikan bentuk dan material dari tabung. M_o atau *plastic bending moment* merepresentasikan material dari tabung.

5.6.1 Tabung segi-empat

Gambar 5.24, menunjukkan grafik P_m/M_o terhadap tebal[t] /keliling [k] pada tabung segi-empat dari hasil analitik, numerik dan eksperimen. Besarnya harga P_m/M_o ditentukan oleh harga P_m tabung pada setiap kelilingnya. Untuk hasil analitik, kecenderungan yang terjadi bahwa semakin besar harga t/k maka diikuti dengan penurunan harga dari P_m/M_o . Pada hasil numerik dapat dilihat bahwa harga P_m/M_o menunjukkan kecenderungan yang sama dengan hasil analitik, namun harga P_m/M_o lebih rendah dibandingkan dengan harga analitik . Sedangkan untuk hasil eksperimen juga menunjukkan kecenderungan yang sama, walaupun pada keliling tertentu terjadi kenaikan secara signifikan.



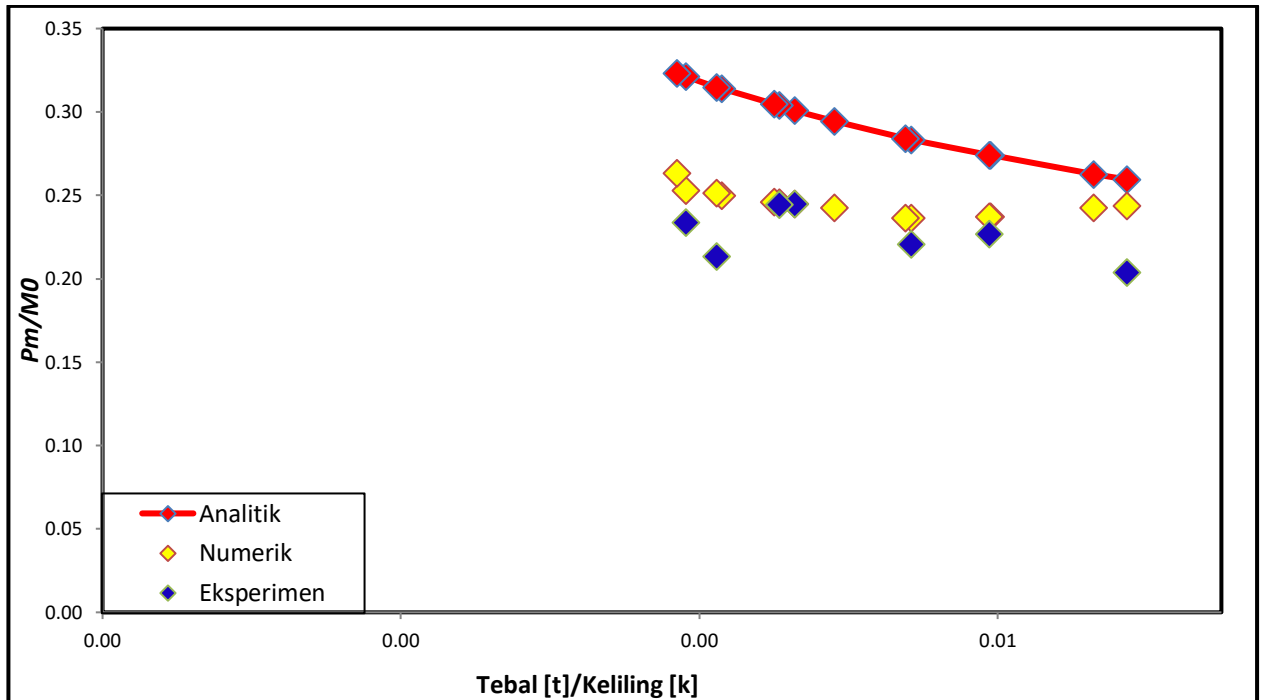
Gambar 5.24 Grafik P_m/M_o terhadap t/k pada tabung segi-empat

Perbedaan hasil P_m/M_o analitik dengan P_m/M_o numerik terbesar sebesar 46.68 % untuk tabung segi-empat dengan keliling 148 mm, sedangkan perbedaan paling kecil sebesar 25.85 % untuk tabung segi-empat dengan keliling 190.70 mm. Perbedaan rata-rata antara harga P_m/M_o analitik dan P_m/M_o numerik sebesar 37.65 % . Perbedaan hasil P_m/M_o analitik dengan P_m/M_o eksperimen terbesar sebesar 73.51 % untuk tabung segi-empat dengan keliling 168.02 mm, sedangkan perbedaan paling kecil sebesar 41.53 % untuk tabung segi-empat dengan keliling 139.20 mm. Perbedaan rata-rata antara harga P_m/M_o analitik dan P_m/M_o eksperimen sebesar 57.41 % . Sedangkan untuk Perbedaan hasil P_m/M_o numerik dengan P_m/M_o eksperimen terbesar sebesar 28.65 % untuk tabung segi-empat dengan keliling 168.02 mm, sedangkan perbedaan paling kecil sebesar -1.86 % untuk tabung segi-empat dengan keliling 139.20 mm dengan perbedaan rata-rata sebesar 15.31 %.

5.6.2 Tabung segi-enam

Gambar 5.25, menunjukkan grafik P_m/M_o terhadap tebal/keliling tabung segi-enam. Kecenderungan P_m/M_o terhadap tebal/keliling yang dilihat dari hasil analitik, numerik dan eksperimen pada tabung segi-enam sama dengan kecenderungan pada tabung segi-empat.

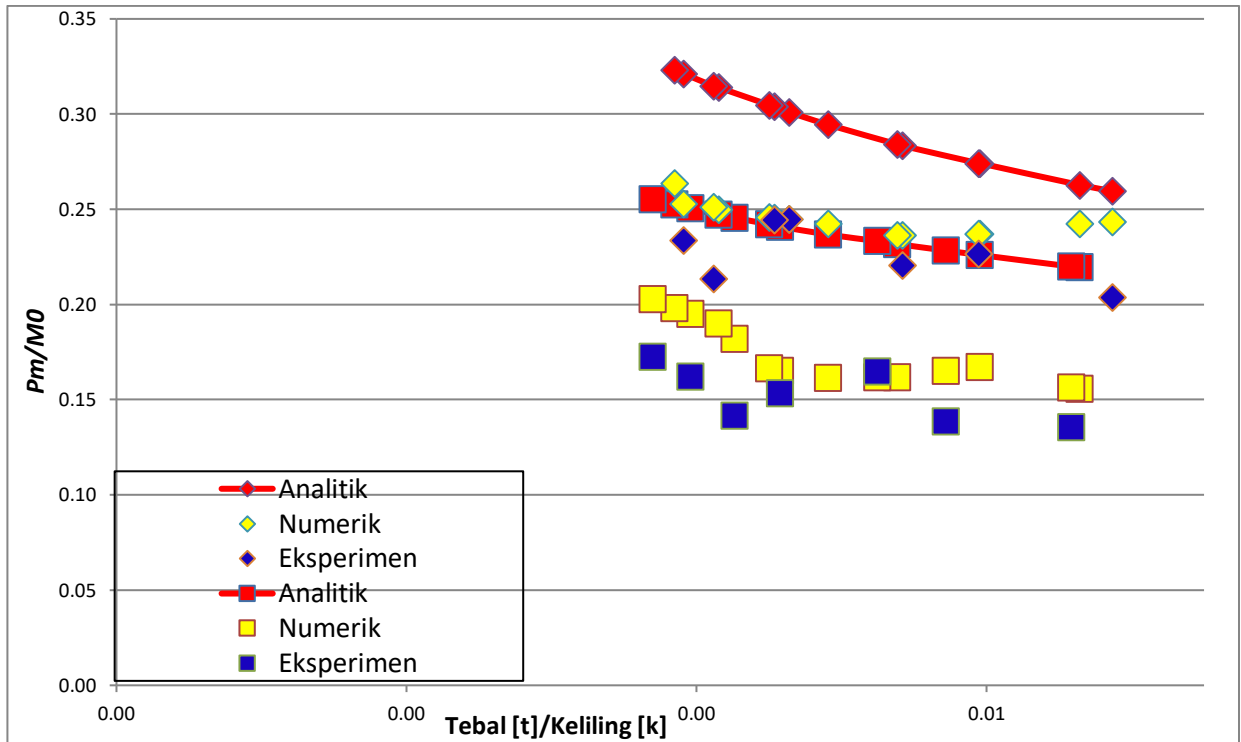
Perbedaan hasil P_m/M_o analitik dengan P_m/M_o numerik terbesar sebesar 25.73 % untuk tabung segi-enam dengan keliling 172.00 mm, sedangkan perbedaan paling kecil sebesar 6.59 % untuk tabung segi-enam dengan keliling 108.60 mm. Rata-rata perbedaan antara harga P_m/M_o analitik dan P_m/M_o numerik sebesar 19.68 % . Perbedaan hasil P_m/M_o analitik dengan P_m/M_o eksperimen terbesar sebesar 47.49 % untuk tabung segi-enam dengan keliling 173.34 mm, sedangkan perbedaan paling kecil sebesar 20.91 % untuk tabung segi-enam dengan keliling 124.19 mm. Rata-rata perbedaan antara harga P_m/M_o analitik dan P_m/M_o eksperimen sebesar 29.87 % . Sedangkan untuk Perbedaan hasil P_m/M_o numerik dengan P_m/M_o eksperimen terbesar sebesar 19.51 % untuk tabung segi-enam dengan keliling 108.60 mm, sedangkan perbedaan paling kecil sebesar 0 % untuk tabung segi-enam dengan keliling 155.68 mm. Rata-rata perbedaan antara harga P_m/M_o numerik dan P_m/M_o eksperimen sebesar 8.69 %.



Gambar 5.25 Grafik P_m/M_0 terhadap tebal/keliling pada tabung segi-enam

5.7 Perbandingan harga P_m/M_0 antara tabung segi-empat dan segi-enam dengan menggunakan metode analitik, metode numerik, dan metode eksperimen.

Gambar 5.26, menunjukkan perbandingan harga P_m/M_0 antara tabung segi-empat dan segi-enam dengan menggunakan metode analitik, metode numerik, dan metode eksperimen. Untuk hasil analitik, menunjukkan bahwa harga P_m/M_0 tabung segi-enam lebih besar dibandingkan dengan tabung segi-empat. Perbedaan harga P_m/M_0 berkisar antara 18.29 % hingga 27.27 %, dengan perbedaan rata-rata sebesar 23.50 %. Untuk hasil numerik kecenderungan harga P_m/M_0 sama dengan hasil analitik, dimana tabung segi-enam harga P_m/M_0 lebih tinggi dari pada harga P_m/M_0 tabung segi-empat. Perbedaan harga P_m/M_0 berkisar antara 27.61 % hingga 56.51 %, dengan perbedaan rata-rata sebesar 42.28 %. Sedangkan untuk hasil eksperimen kecenderungan harga P_m/M_0 sama dengan hasil analitik dan hasil numerik, Tabung segi-enam memiliki harga P_m/M_0 paling tinggi dari pada tabung segi-empat, namun besarnya perbedaan harga P_m/m_0 antara tabung segi-enam dan tabung segi-empat tidak dapat dihitung karena memiliki harga tebal/keliling yang berbeda.



Gambar 5.26 Grafik perbandingan harga P_m/M_0 pada tabung segi-empat dan segi-enam dengan metode analitik, metode numerik dan metode eksperimen

5.8 Parameter non-dimensional η - ϕ untuk penampang segi-empat dan segi-enam

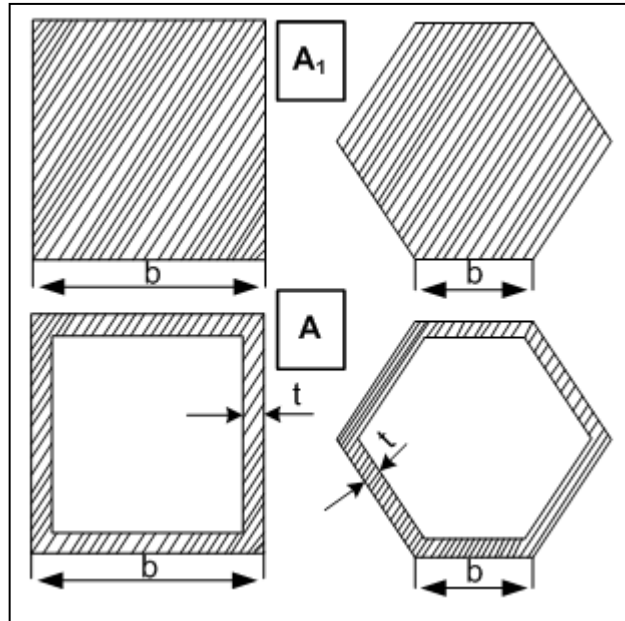
Parameter non-dimensional lain yang digunakan dalam analisis ini adalah *structural effectiveness* yaitu :

$$\eta = \frac{P_m}{A \sigma_o} \quad (5.2)$$

Serta relative density atau solidity ratio :

$$\phi = \frac{A}{A_1} \quad (5.3)$$

Dimana A adalah luas area tumbukan dan A_1 adalah luas area penampang. Keterangan A dan A_1 dijelaskan pada gambar 5.28.

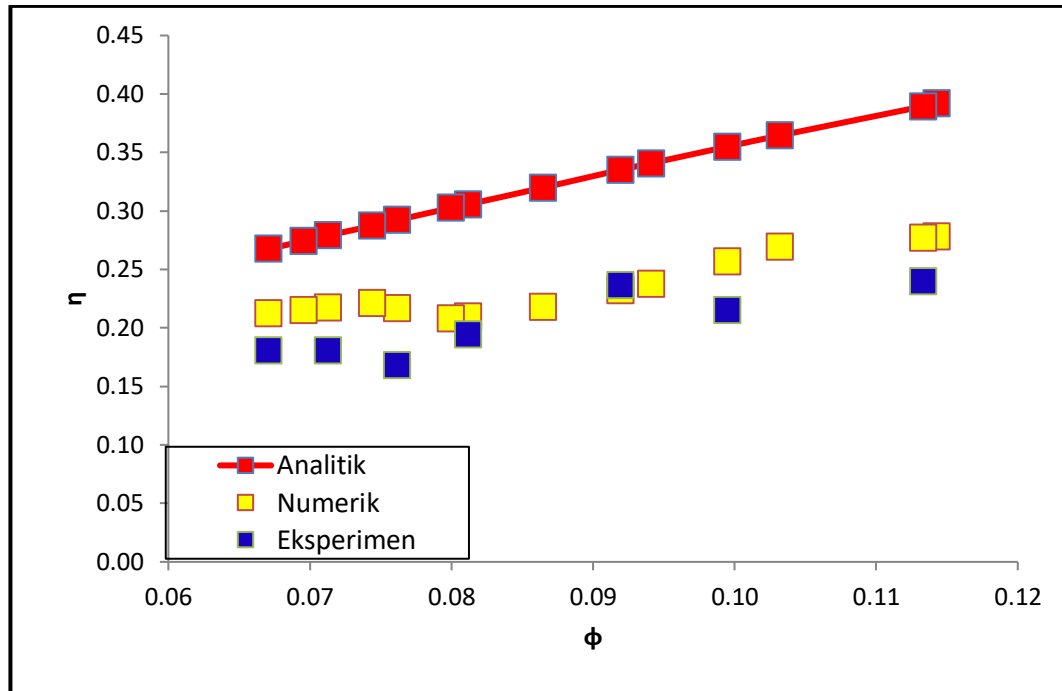


Gambar 5.27 Luas area tumbukan dan luas area penampang

5.8.1 Tabung segi-empat

Gambar 5.28, menunjukkan grafik $\eta-\varphi$ untuk tabung segi-empat dari hasil analitik, numerik dan eksperimen. Parameter non-dimensional $\eta-\varphi$ menunjukkan keefektifan struktur dalam menyerap energi. Semakin besar harga η maka penyerapan energinya baik atau mampu menyerap energi lebih besar. Harga $\eta-\varphi$ hasil analitik paling tinggi diantara hasil numerik dan eksperimen. Dapat diamati pada gambar bahwa setiap kenaikan harga dari φ selalu diikuti dengan kenaikan harga η . Untuk hasil numerik memiliki kecenderungan yang sama dengan hasil analitik, namun harga η lebih rendah bila dibandingkan dengan harga η yang diperoleh dari hasil analitik. Sedangkan hasil eksperimen juga memiliki kecenderungan yang sama namun harga rata-rata $\eta-\varphi$ paling rendah dari ketiga hasil metode.

Perbedaan harga $\eta-\varphi$ hasil analitik dan hasil numerik untuk tabung segi-empat berkisar antara 25.85 % hingga 46.68 % dengan perbedaan rata-rata sebesar 37.65 %. Perbedaan harga $\eta-\varphi$ hasil analitik dan eksperimen berkisar antara 41.53 % hingga 73.51 % dengan perbedaan rata-rata sebesar 57.41 %. Sedangkan perbedaan harga $\eta-\varphi$ hasil numerik dan eksperimen berkisar antara -1.86 % hingga 28.65 % dengan perbedaan rata-rata sebesar 15.31 %.

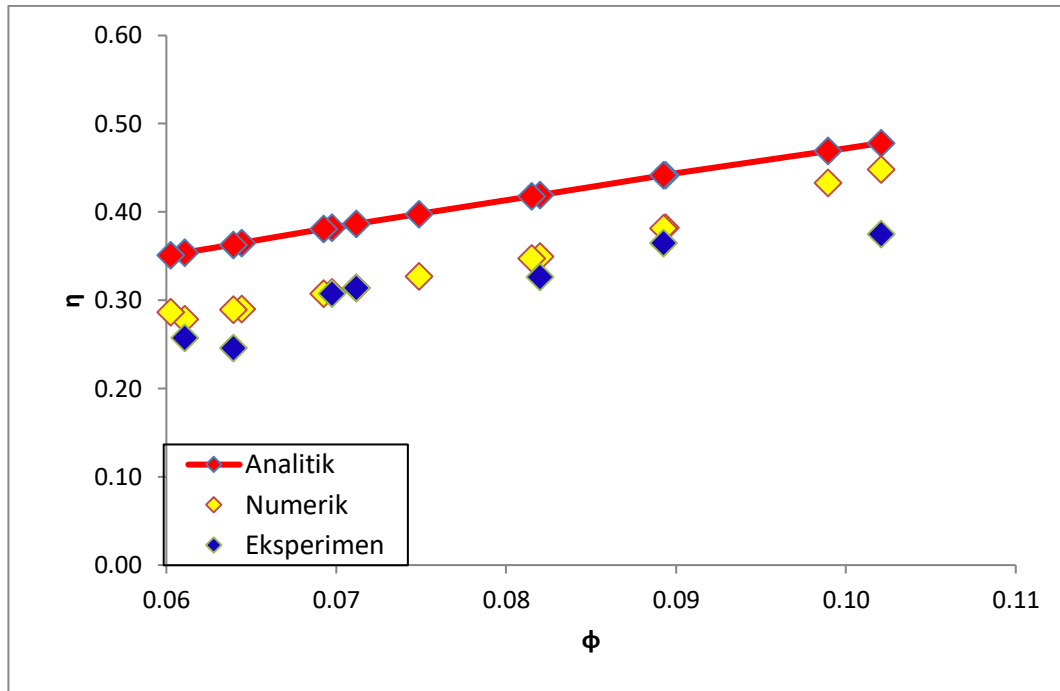


Gambar 5.28 Grafik η terhadap ϕ untuk tabung segi-empat

5.8.2 Tabung segi-enam

Gambar 5.29, menunjukkan grafik η - ϕ untuk tabung segi-enam dari hasil analitik, numerik dan eksperimen. Dapat diamati pada gambar bahwa setiap kenaikan harga dari ϕ selalu diikuti dengan kenaikan harga η . Untuk hasil numerik memiliki kecenderungan yang sama dengan hasil analitik, namun harga η lebih rendah bila dibandingkan dengan harga η yang diperoleh dari hasil analitik. Sedangkan hasil eksperimen juga memiliki kecenderungan yang sama namun harga rata-rata η - ϕ paling rendah dari ketiga hasil metode.

Perbedaan harga η - ϕ antara hasil analitik dan numerik untuk tabung segi-enam berkisar antara 6.59 % hingga 25.73 % dengan perbedaan rata-rata sebesar 19.68 %. Perbedaan harga η - ϕ antara hasil analitik dan eksperimen untuk tabung segi-enam berkisar antara 20.91 % hingga 47.49 % dengan perbedaan rata-rata sebesar 29.87 %. Sedangkan perbedaan harga η - ϕ antara hasil numerik dan eksperimen berkisar antara 0 % hingga 19.51 %, dengan perbedaan rata-rata sebesar 8.69 %.

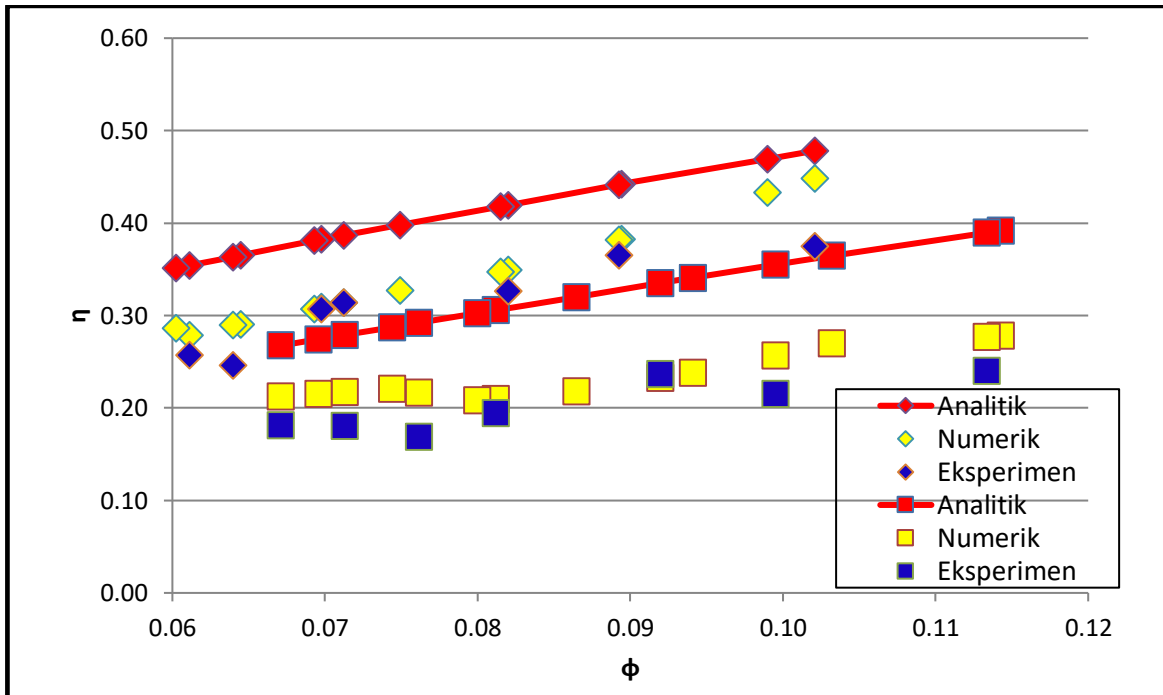


Gambar 5.29 Grafik η terhadap ϕ pada tabung segi-enam

5.9 Perbandingan harga P_m/M_0 antara tabung segi-empat dan segi- enam dengan menggunakan metode analitik, metode numerik , dan metode eksperimen.

Gambar 5.30, menunjukkan Grafik perbandingan harga $\eta-\phi$ pada tabung segi-empat dan segi-enam dengan metode analitik, metode numerik dan metode eksperimen. Untuk hasil analitik, harga $\eta-\phi$ untuk tabung segi-enam lebih tinggi pada tabung segi-empat , begitu juga dengan hasil numerik dan eksperimen. Hal ini dapat dikatakan bahwa tabung segi-enam memiliki penyerapan energi paling baik jika dibandingkan dengan segi-empat.

Untuk hasil analitik, perbedaan harga η antara penampang tabung segi-enam dan tabung segi-empat berkisar antara 20.45 % hingga 31.30 % dengan perbedaan rata-rata sebesar 27.64 %. Untuk hasil numerik, perbedaan harga η antara penampang tabung segi-enam dan tabung segi-empat berkisar antara 31.39 % hingga 61.41 % dengan perbedaan rata-rata sebesar 48.08 %. Sedangkan untuk hasil eksperimen perbedaan harga rata-rata antara tabung segi-enam dan tabung segi-empat tidak dapat dilakukan karena memiliki harga ϕ yang berbeda.



5.30 Gambar Grafik perbandingan harga η - ϕ pada tabung segi-empat dan segi-enam dengan metode analitik, metode numerik dan metode eksperimen

Bab 6 Kesimpulan dan saran

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen uji tumbuk, simulasi numerik dengan menggunakan MEH non-linier serta perhitungan analitik maka dapat disimpulkan hal sebagai berikut :

1. Dari hasil eksperimen uji tumbuk yang dilakukan pada tabung berpenampang segi-empat dan segi-enam dengan keliling yang berbeda, perpindahan total tabung untuk setiap kenaikan keliling cenderung makin kecil untuk kecepatan yang hampir sama besar.
2. Pada hasil eksperimen dan hasil numerik , perbandingan pola lipatan dan jumlah lipatan tabung segi-empat untuk keliling 112 mm (numerik) dan keliling 112.09 mm (eksperimen) adalah sama. Sedangkan untuk perbandingan pola lipatan tabung segi-enam untuk keliling 112 mm (numerik) dan keliling 108.60 mm (eksperimen) adalah berbeda karena pada tabung eksperimen terdapat ketidaksempurnaan pada salah satu sisi tabung.
3. Untuk metode analitik harga P_m (*mean crushing force*), P_m/m_0 (*normalized mean crushing force*), dan $\eta-\phi$ (*structural effectiveness*) pada tabung segi-empat dan segi-enam paling tinggi dari pada menggunakan metode eksperimen dan numerik.
4. Untuk tabung segi-empat, perbedaan P_m antara hasil analitik dengan P_m hasil numerik berkisar antara 27.41 % untuk tabung keliling 184.00 mm hingga 46.68 % untuk tabung keliling 148 mm, dengan perbedaan rata-rata untuk perbandingan 14 variasi keliling tabung sebesar 37.65 %. Perbedaan P_m antara hasil analitik dengan P_m hasil eksperimen berkisar antara 41.30 % untuk tabung keliling 139.20 mm hingga 73.51 % untuk tabung dengan keliling 168.02 mm dengan perbedaan rata-rata untuk perbandingan 7 variasi keliling tabung sebesar 57.41 %. Sedangkan perbedaan hasil numerik dan eksperimen berkisar antara -1.86 % untuk tabung keliling 139.20 mm hingga 28.56 % untuk tabung keliling 168.02 mm dengan perbedaan rata-rata sebesar 15.31 % .

5. Untuk tabung segi-enam, perbedaan hasil P_m/M_o analitik dengan P_m/M_o numerik terbesar sebesar 27.08 % untuk tabung segi-enam dengan keliling 181.42 mm, sedangkan perbedaan paling kecil sebesar 6.59 % untuk tabung segi-enam dengan keliling 124.19 mm. Rata-rata perbedaan antara harga P_m/M_o analitik dan P_m/M_o numerik sebesar 19.95 %. Perbedaan hasil P_m/M_o analitik dengan P_m/M_o eksperimen terbesar sebesar 47.49 % untuk tabung segi-enam dengan keliling 173.34 mm, sedangkan perbedaan paling kecil sebesar 20.91 % untuk tabung segi-enam dengan keliling 124.19 mm. Rata-rata perbedaan antara harga P_m/M_o analitik dan P_m/M_o eksperimen sebesar 29.87 %. Sedangkan untuk Perbedaan hasil P_m/M_o numerik dengan P_m/M_o eksperimen terbesar sebesar 19.51 % untuk tabung segi-enam dengan keliling 108.60 mm, sedangkan perbedaan paling kecil sebesar 0 % untuk tabung segi-enam dengan keliling 155.68 mm. Rata-rata perbedaan antara harga P_m/M_o numerik dan P_m/M_o eksperimen sebesar 8.22 %.
6. Harga P_m (*mean crushing force*), P_m/M_o (*normalized mean crushing force*), dan $\eta-\phi$ (*structural effectiveness*) untuk penampang tabung segi-enam lebih besar dibandingkan dengan tabung segi-empat.

6.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya:

1. Pembuatan tabung spesimen untuk eksperimen uji tumbuk dibutuhkan persiapan yang matang. Material yang direncanakan, geometri yang diinginkan dan proses produksi yang akan dilakukan harus dipelajari terlebih dahulu, agar geometri tabung yang dihasilkan sesuai dengan yang diinginkan.
2. Dilakukan simulasi dengan perangkat lunak lain untuk dibandingkan hasilnya dengan dengan perangkat lunak LS-DYNA.
3. Sebagai sensor gaya pada alat uji tumbuk dinamik, *load cell* sebaiknya dikalibrasi dengan menggunakan alat uji kompresi dinamik.
4. Uji tarik material untuk kasus tumbukan dinamik sebaiknya menggunakan *dynamic tensile test* untuk mengetahui harga *strain rate* pada material.
5. Pada alat uji tumbuk perlu dilengkapi :
 - high speed camera, yang digunakan untuk mengetahui perpindahan tabung selama tumbukan berlangsung.
 - Sensor ketinggian yang digunakan untuk mengetahui ketinggian jatuh penumbuk sesuai dengan yang diinginkan, tujuannya untuk menghasilkan ketelitian yang lebih baik.
 - Alat akusisi data yaitu *transient converter* yang digunakan untuk mengetahui besarnya gaya yang dihasilkan selama tumbukan pada uji eksperimen perlu diganti dengan alat yang lebih baru , karena pengambilan data serta pengolahanya membutuhkan waktu yang lama.

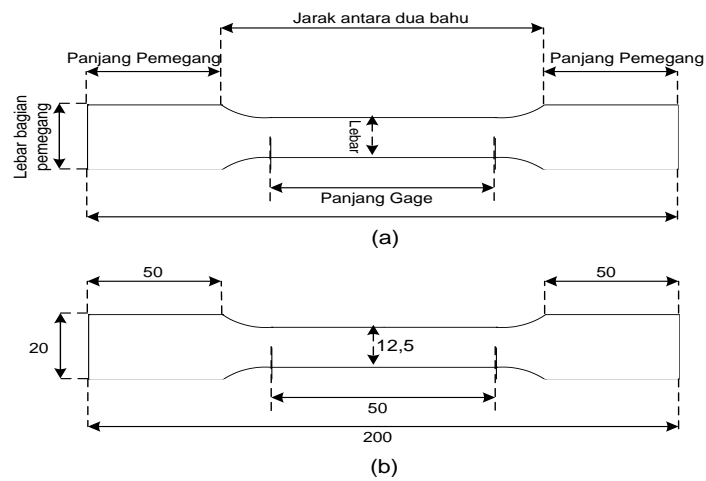
DAFTAR PUSTAKA

1. www.Ohiohistory.central.org/entry. “*World’s first Automobile Accident*” ; Juli 2006.
2. “Kecelakaan kendaraan bermotor dalam kurun waktu setahun”; edisi 17 juli 2007.
3. Frank,T., Gruber.K.;*Numerical simulation of frontal impact and offset collision*; Cray research Inc., Cray Channels:2-6,1992.
4. Magnus Langseth.; *Crasworthiness of light-weight automotive structure*; 2001-2006; In norlight Conference 2003, 2003.
5. US Patent No. US 7,213,867 dated on 8th May 2007: Shock absorbing device for vehicle and shock absorbing structure for vehicle.
6. US Patent No. US 7,201,414 dated on 10th April 2007: Shock absorbing structure for a vehicle.
7. US Patent No. US 7,201,413 dated on 10th April 2007: *Crash Box*.
8. Ly Hung Anh; *Behaviour of Thin-Walled Prismatic Structures Subjected to Low Velocity Impact Loading*; Program Studi Teknik Penerbangan, Fakultas Teknologi Industri, ITB; 2007
9. Minda Mora; *Low Velocity Impact Analysis of Double-Walled Prismatic Structures Filled with Foam Core*; Program Studi Teknik Penerbangan, Fakultas Teknologi Industri, ITB; 2008
10. Simon sindhu. H.; Kaji parametrik kasus tumbukan kecepatan rendah pada tabung berpenampang lingkaran dengan metode elemen hingga.
11. Fajri Syah Alam, Kaji parametrik kasus tumbukan berkecepatan rendah pada tabung berpenampang lingkaran, segi-enam dan bujursangkar menggunakan material AL 6060 T4 dengan metode elemen hingga
12. Langseth,M., Hopperstad,OS.; “ *Static and Dynamic Axial Crushing of Square Thin Walled Aluminium Extrusions.*”;30 May 1996.
13. Auto motor and Sport Spezial; 1990.

14. Faik S., Witteman H.; *Modeling of Impact Dynamics: A Literature Survey*; Internationals ADAMS User Conference; 2000.
15. Tarigopula, V., Langseth, M., Hopperstad, O.S., Clausen, A.H.; *Axial Crushing of Thin-Walled High-Strength Steel Sections*; International Journal of Impact Engineering 32, pp. 847-882; 2006
16. Abramowicz, W., Jones, N.; *Dynamic Axial Crushing of Square Tubes*; Int.j.Impact Engineering. Vol.2, No.3, pp.263-281; 1984
17. Abramowicz, W., Wierzbicki, T.; *Axial Crushing of Multicorner Sheet Metal Columns*; Journal of Applied Mechanics, No.1, Vol. 56, pp. 113-120; 1989.
18. Abramowicz, W., Jones, N.; *Dynamic Axial Crushing of Circular Tubes*; Int.j.Impact Engineering. Vol.2, No.3, pp.263-281; 1984
19. Supemda Siahaan.; *Perancangan Struktur Alat Impak Kecepatan Rendah Berkapasitas Pemberat Maksimum 150 Kg.*
20. Vu chi tanh “*Development of Dynamic Load Cell for Low Velocity Axial Impact Testing.*”

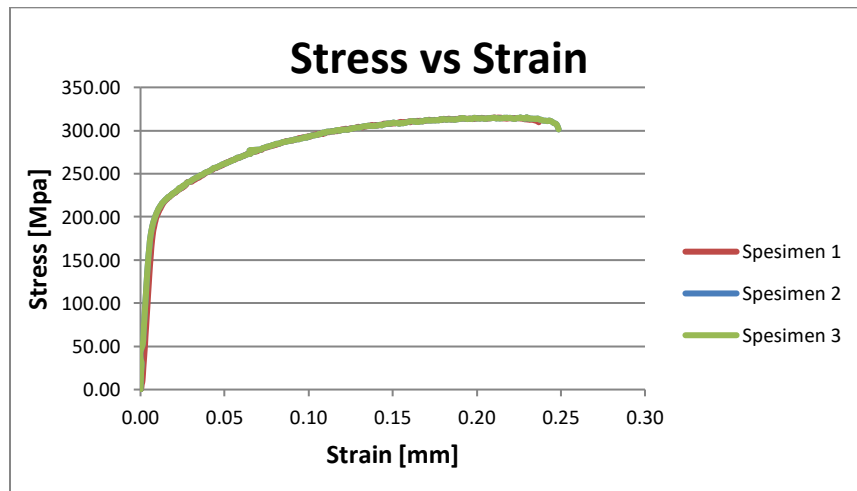
Lampiran A- 1

Data Uji Tarik AA 6061 T4

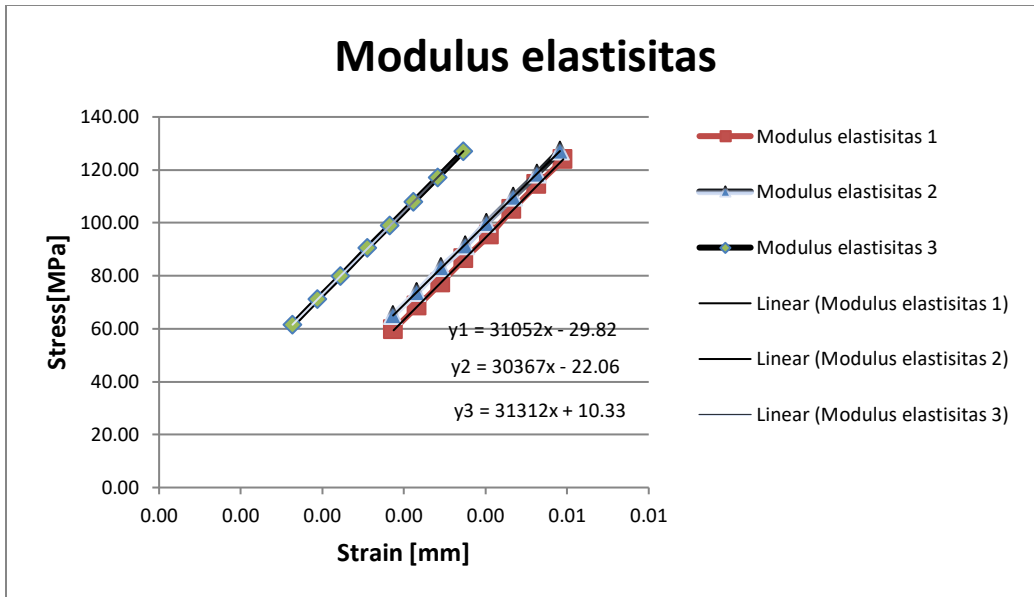


Gambar A-1. 1 Geometri spesimen uji tarik

Pengujian tarik dilakukan di PT.DI dengan geometri spesimen AA 6061 T4 seperti diatas (sesuai dengan ASTM vol 03.01 E-89 *Tension testing of metallic materials*) . Jumlah spesimen yang diuji adalah tiga spesimen. Berikut adalah kurva tegangan dan regangan serta modulus elastisitas dari tiap-tiap spesimen.



Gambar A-1. 2 Kurva tegangan dan regangan dari hasil uji tarik tiga spesimen



Gambar A-1. 3 Modulus Elastisitas hasil uji tarik tiga spesimen

Properti dari uji tarik masing-masing spesimen :

Tabel A-1. 1 properti hasil uji tarik material AA 6061-T4

	Modulus elastisitas [GPa]	Yield strength [GPa]	Ultimate strength [GPa]
Spesimen 1	31.052	0.206	0.315
Spesimen 2	30.367	0.208	0.314
Spesimen 3	31.312	0.207	0.314
Rata-Rata	30.910	0.210	0.310

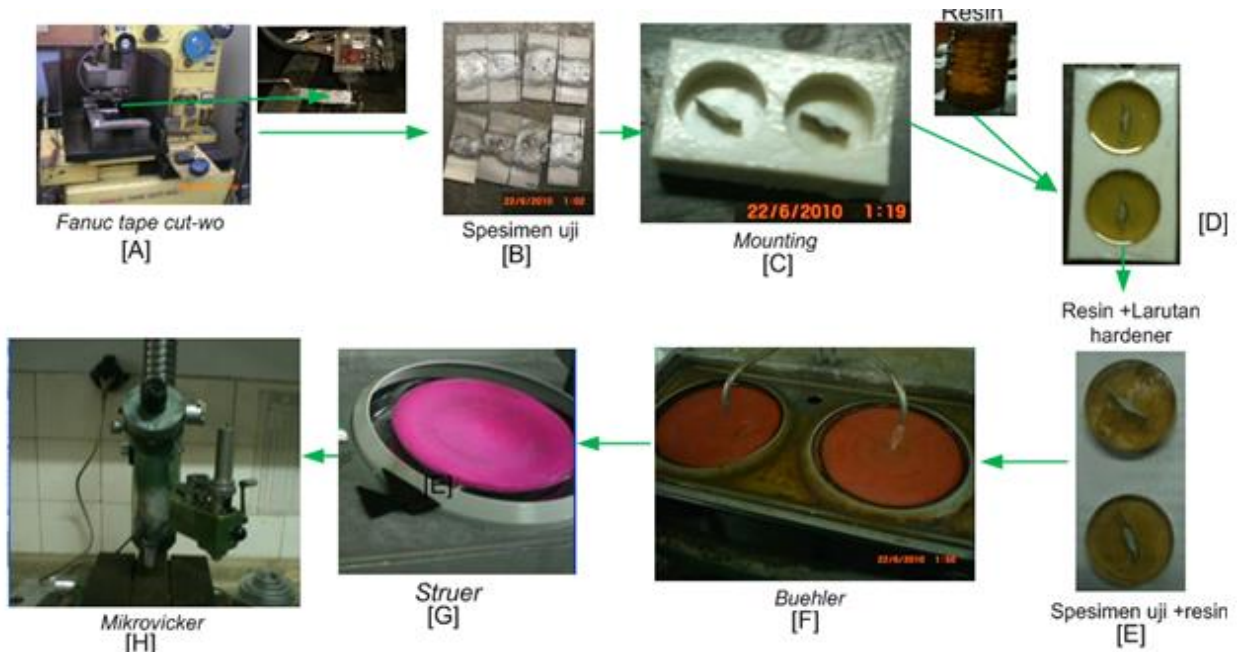
Dari data diatas ternyata modulus elastisitas dari masing-masing spesimen jauh lebih kecil dibandingkan dengan modulus elastisitas aluminium yaitu turun sekitar 55.13 % jika dibandingkan dengan referensi ASM [www.asm.matweb.com]. Sedangkan untuk *Ultimate strength* naik sebesar 42.75 % . Jadi hasil uji tarik diatas tidak valid untuk diinput dalam analisis teoritik, numerik, karena akan sangat mempengaruhi harga P_m [*mean crushing force*] dari teoritik dan numerik. Oleh karena itu, hasil uji tarik diatas tidak dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut, sehingga pendekatan dengan referensi ASM [www.asm.matweb.com] di gunakan sebagai acuan untuk menganalisis tabung AA 6061-T4 dengan menggunakan metoda teoritik dan numerik.

Lampiran A- 2

Pengujian *Microhardness Vickers*

Pengujian *Microhardness Vickers* adalah salah satu pengujian mekanik yang dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan suatu material. Pengujian ini dilakukan dengan mengasumsikan bahwa spesimen uji homogen dan isotropik. Spesimen diambil dari salah satu bagian sisi tabung segi-empat dimana terdapat daerah las-lasan pada bagian tengahnya.

Tahapan yang dilakukan untuk melakukan pengujian ini adalah sebagai berikut :



Gambar A-2. 1 Langkah pengerjaan pembuatan spesimen uji untuk pengujian *Microhardness Vickers*

- *Cutting* , spesimen uji dipotong dengan alat *fanuc tape cut-two* [A] dengan panjang 22 mm dan lebar 1 mm untuk masing-masing spesimen.
- *Moulding*, spesimen dimasukkan kedalam *mounting* [B] dan kemudian akan dicampur dengan resin dan larutan hardener agar spesimen menjadi kaku, sehingga memudahkan dalam proses indentasi (pemberian beban pada spesimen dengan indenter berbentuk piramida yang terbuat dari intan) [16]. Hasil proses setelah spesimen dicampur dengan resin dan larutan hardener dapat dilihat pada gambar [D] dan [E].

- *Grinding*, setelah spesimen dikeluarkan dari *mounting* (gambar [E]) dapat dilihat bahwa permukaan spesimen tidak rata dan kasar sehingga perlu dilakukan penghalusan dan pemerataan pada permukaan spesimen. Pengerjaan ini dilakukan dengan menggunakan alat *Buehler* [F] berbentuk piringan dan berotasi atau berputar pada kedudukannya. Pada bagian permukaan piringan ditempelkan amplas, lalu disiram sedikit dengan air agar permukaan piringan dan amplas merekat satu sama lain. Setelah *buehler* diputar maka permukaan spesimen ditempelkan ke permukaan amplas untuk menghasilkan permukaan spesimen yang halus dan rata.
- *Polishing*, setelah permukaan spesimen di amplas, maka pada bagian permukaan tersebut dihasilkan goresan-goresan kecil akibat pengaruh dari proses *grinding*. Untuk mengatasi hal tersebut, perlu dilakukan *polishing* atau pemolesan pada permukaan spesimen. Pengerjaan pemolesan dilakukan dengan menggunakan alat *struer* [G] dimana alat tersebut memiliki bentuk dan cara kerja yang sama seperti alat *buehler*, namun pada permukaan piringan ditempelkan kain poles, lalu permukaan kain poles ditaburi serbuk alumina yang bertujuan untuk menghilangkan goresan-goresan kecil yang terdapat pada permukaan spesimen disaat permukaan spesimen tersebut ditempelkan pada kain poles yang berputar pada kedudukannya. Setelah permukaan spesimen halus, maka pengujian *Microhardness Vickers* [H] dapat dilakukan.

Spesimen uji terdiri dari tiga spesimen. dimana terdapat 15 titik pengujian tiap-tiap spesimen yaitu 5 titik pada ujung bagian kanan dan bagian kiri serta 5 titik lagi pada daerah las-lasan (*welding*). Beban yang digunakan adalah sebesar 0.2 kg.

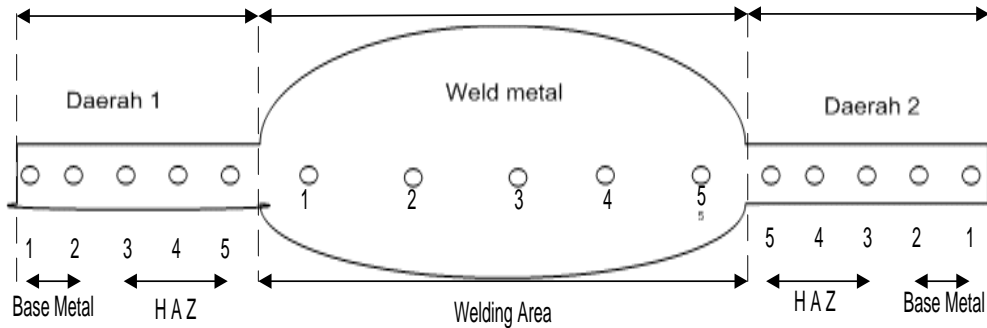
Harga kekerasan microvickers dihitung dengan rumus :

$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \quad HV = 1.854 \frac{F}{d^2}$$

Dimana : F = beban (kgf)
 D = diagonal dari indentasi
 HV = harga kekerasan Vickers

Metode ini digunakan untuk mengetahui distribusi harga kekerasan yang mewakili seluruh permukaan spesimen.

Lihat gambar A-2. 2 ini merupakan urutan identasi pengujian yang terdiri dari 15 titik pengujian , yaitu pada daerah 1 pengujian dimulai pada daerah paling kiri ke kanan, pada daerah 2, pengujian dimulai dari daerah paling kanan ke kiri, sedangkan daerah las-lasan pengujian dimulai dari kiri ke kanan.



Gambar A-2. 2 Urutan identasi pada pengujian *Microhardness Vickers*

Berikut adalah tabel hasil identasi pada pengujian Hardness Vickers :

Tabel A-2.1 Hasil identasi

	Spesimen A			Spesimen B			Spesimen C				
	Titik	Diameter [mm]	VHN	Titik	Diameter [mm]	VHN	Titik	Diameter [mm]	VHN	Average [VHN]	Area
DAERAH 1	1	0.08	60.90	1	0.08	65.90	1	0.07	77.80	68.20	Base Metal
	2	0.08	60.90	2	0.08	64.00	2	0.07	71.40	65.43	
	3	0.08	62.40	3	0.08	64.00	3	0.07	71.40	65.93	Haz
	4	0.08	63.00	4	0.08	59.30	4	0.07	67.60	63.30	
	5	0.08	60.90	5	0.08	63.00	5	0.07	67.60	63.83	
WELD METAL	1	0.07	67.60	1	0.08	57.90	1	0.07	67.60	64.37	welding area
	2	0.07	67.60	2	0.08	57.90	2	0.08	65.90	63.80	
	3	0.08	57.90	3	0.08	52.50	3	0.08	62.40	57.60	
	4	0.08	59.30	4	0.08	56.40	4	0.07	71.40	62.37	
	5	0.08	62.40	5	0.08	57.90	5	0.07	71.40	63.90	
DAERAH 2	1	0.08	60.90	1	0.08	65.90	1	0.08	59.30	62.03	Base Metal
	2	0.08	57.90	2	0.07	67.60	2	0.08	57.90	61.13	
	3	0.08	60.20	3	0.08	67.60	3	0.08	65.90	64.57	Haz
	4	0.08	57.90	4	0.08	65.90	4	0.07	67.60	63.80	
	5	0.08	60.20	5	0.08	65.90	5	0.08	65.90	64.00	

Keterangan :

Area yang diuji meliputi *Base metal*, *HAZ*, dan *Welding area*. *Base metal* merupakan material logam yang tidak terpengaruh oleh efek panas, sedangkan *HAZ* merupakan bagian dari logam yang terpengaruh efek panas dan *welding area* merupakan daerah las-lasan yang berfungsi sebagai sambungan (*joining*) dari dua pelat yang terpisah.

VHN : Merupakan *Vickers Hardness Number* yaitu kekerasan suatu material yang diukur dari indentasi pada alat uji *Vickers*. Hasil *VHN* didapat setelah mengkonversikan besarnya diameter indentasi yang dilihat dari alat pengujian *Vickers*

Average : Merupakan hasil rata-rata dari nilai *VHN* pada spesimen 1, 2 dan 3.

Berikut adalah rata-rata *VHN* pada masing-masing area :

Tabel A-2. 2 Hasil rata-rata indentasi pada masing-masing area

	Area Identasi	Average [VHN]
DAERAH 1	<i>Base metal</i>	66.82
	<i>HAZ</i>	64.36
WELDING AREA	<i>Welding area</i>	62.41
DAERAH 2	<i>Base metal</i>	61.58
	<i>HAZ</i>	64.12

Dari tabel A-2. 2 dapat dikatakan bahwa harga kekerasan untuk *base metal* dan *HAZ* rata-rata untuk daerah 1 dan daerah 2 adalah sama sebesar 64.2 *VHN* ini artinya antara *base metal* dan *HAZ* memiliki kekerasan yang sama sedangkan *welding area* memiliki kekerasan sebesar 62.4 *VHN* . Sehingga pada pengujian ini dapat disimpulkan bahwa pada daerah *welding area* kekerasan menurun sekitar 2.8 % dari area *base metal* dan *HAZ* .

Lampiran A- 3

Akuisi Data dan Pengolahan Data Eksperimen

Alat-alat yang perlu di setting :

1. Signal Conditioner

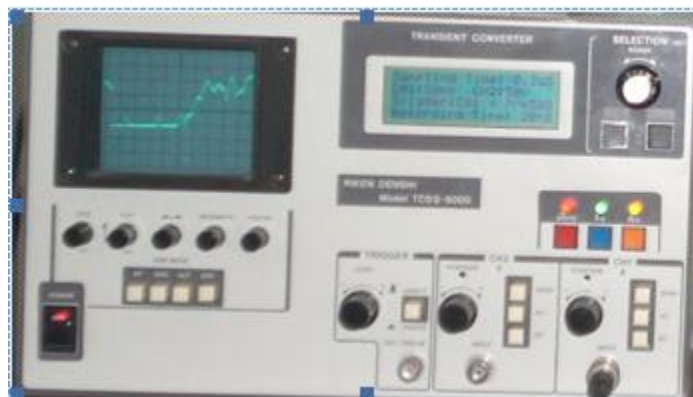


Gambar A-3. 1 Signal Conditioner

Setting :

Panel	Selection
Range	200 (μ s)
L.P.F	1 kHz
Cal	4000

2. Transient Converter (*Dynamic strain meter*)



Gambar A-3. 2 Transient Converter

Setting :

LCD Display	Selection
Sampling time	5 μ s
Sensitivity	500 mv
Trigger	- Pre 500 k
Recording time	20 ms [waktu maksimal]

Pada pengujian eksperimen, gaya yang terjadi pada saat tumbukan akan direkam secara otomatis melalui alat *Transient Converter (dynamic strain meter)* yang dihubungkan ke *motherboard* komputer melalui sebuah perangkat ADC (Analog Digital Converter). Software TCSYS.EXE yang berasal dari alat *Transient converter* diinstal pada komputer dan digunakan untuk pengambilan data dalam bentuk .DAT . Jumlah data angka yang dihasilkan untuk setiap variasi pengaturan adalah sebanyak 8192. Sehingga waktu perekaman maksimal untuk eksperimen ini sebesar ± 40 ms *row* (didasarkan pada *setting sampling time*). Data angka akan dirubah kedalam tegangan (*voltage*) sesuai dengan petunjuk buku manual yang terdapat pada alat *transient converter* . Adapun rumus yang digunakan untuk mencari harga tegangan adalah :

$$Voltage = \frac{sensitivity}{2000} \times (DATA - 2048) \quad (6.1)$$

Untuk mengubah Voltage menjadi sebuah gaya maka Voltage dikali dengan k atau (faktor kalibrasi) yang didapat dari uji kompresi statik pada *load cell* :

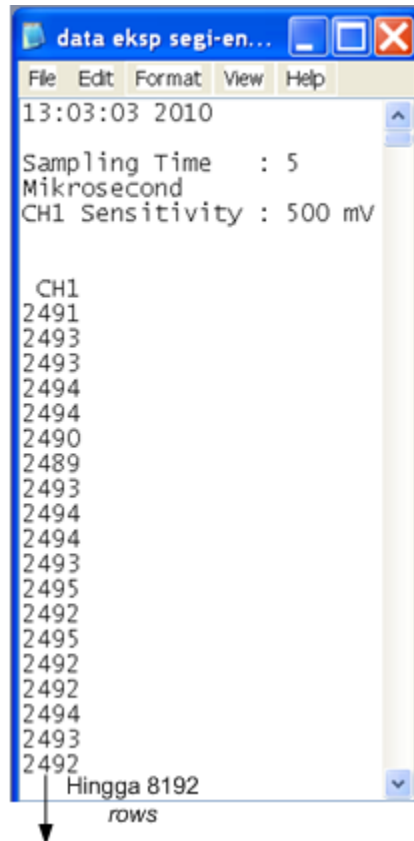
$$Force = Voltage \times k \quad (6.2)$$

Jadi output yang didapat dari eksperimen adalah gaya (*force*) dan waktu (*time*) yang terjadi pada saat tumbukan.

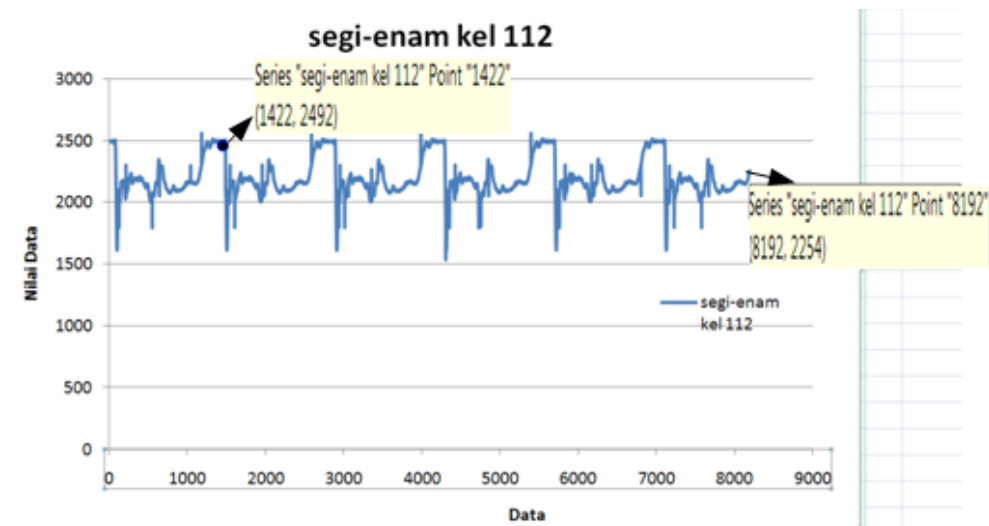
Berikut adalah cara pengolahan data yang dilakukan dalam metode eksperimen dengan menggunakan data eksperimen segi-enam yang memiliki keliling 112 mm :

1. Ouput dari software TCSYS. EXE berupa .DAT yang bisa dibuka melalui notepad [Gambar A-3.3]. Jumlah data yang didapat sebanyak 8192 *row* [Gambar A-3.4]. Di eksperimen ini hasil dari data diulang 6 kali (kesalahan teknis, belum ada penyelesaian)

dengan bentuk dan pola yang sama sehingga data yang diambil hanya satu data dengan jumlah rows sebanyak ± 1422 rows .

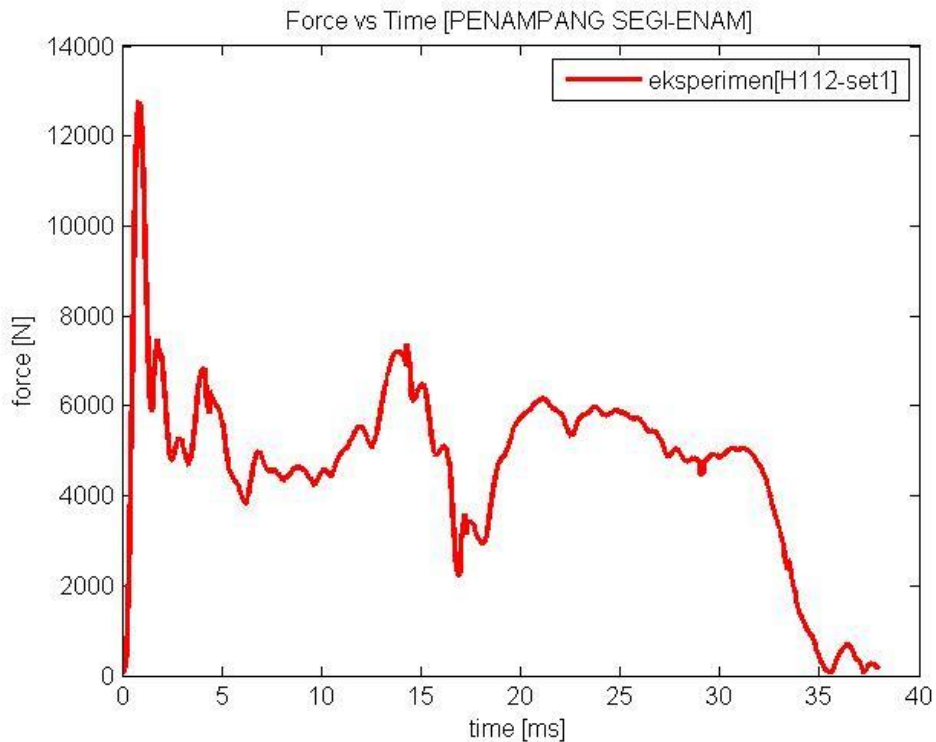


Gambar A-3. 3 Notepad hasil output eksperimen dari data .DAT



Gambar A-3. 4 Plot data .DAT

Untuk mempermudah pekerjaan pengolahan data maka digunakan program *matlab* sehingga, praktis data dapat dipotong dan persamaan 6.1 dan 6.2 diinput kedalam program sehingga data *force vs time* didapatkan.



Gambar A-3. 5 Force vs time dari data eksperimen

Berikut adalah coding matlab untuk mencari *Force* terhadap selang waktunya :

```

%% perbandingan data excel dengan matlab
d = importdata('H108.60.DAT');
d1 = xlsread('forcel12.XLSX'); %data excel
d = d.data;
dt = d(1:(length(d)/6),1); % scaling factor
dt1= abs(d1(:,1));
dt2= d1(:,2);
dt12 = dt2*1000;
% Shift
dsf = dt-(dt(1,1)-2048);
% Voltage
V=(500/2000)*((dsf-2048)/1000); % input tegangan
% Force
F = V*59138.9;
Fdp = abs(F(73:length(F)));
sf = (length(d)-73*6)/length(Fdp);
T=0:(sf*0.005):38; % recording time
T = T(:);
windowSize=7;
Fdpf = filter(ones(1,windowSize)/windowSize,1,Fdp);
Fdp1 =Fdpf(1:length(T)) ;

```

```

plot(T,Fdp1,'r','linewidth',2);
legend('eksperimen[H112-set1]')
title('Force vs Time [PENAMPANG SEGI-ENAM]');
xlabel('time [ms]');ylabel('force [N]');
pause,
close

```

Mencari harga P_m dari data eksperimen :

$$\text{Rumus } P_m \text{ adalah : } \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} P(\delta) d\delta$$

Keterangan :

$P(\delta)$ = *instantaneous force*

P_m = harga rata-rata dari *instantaneous force*

δ = *displacement* atau perpindahan

Dari eksperimen kita hanya memperoleh informasi mengenai *force* dan *interval time* (Output eksperimen), kecepatan awal (dari sensor kecepatan) dan *displacement total* (dari hasil uji tumbuk). Namun untuk menentukan P_m eksperimen diperlukan parameter *displacement* terhadap selang waktu . Jika diasumsikan percepatannya konstan maka dapat digunakan persamaan berikut :

$$S = S_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad (6.3)$$

S : *Displacement total*

S_0 : *Displacement awal*

v_0 : Kecepatan awal

t : waktu total

a : Percepatan

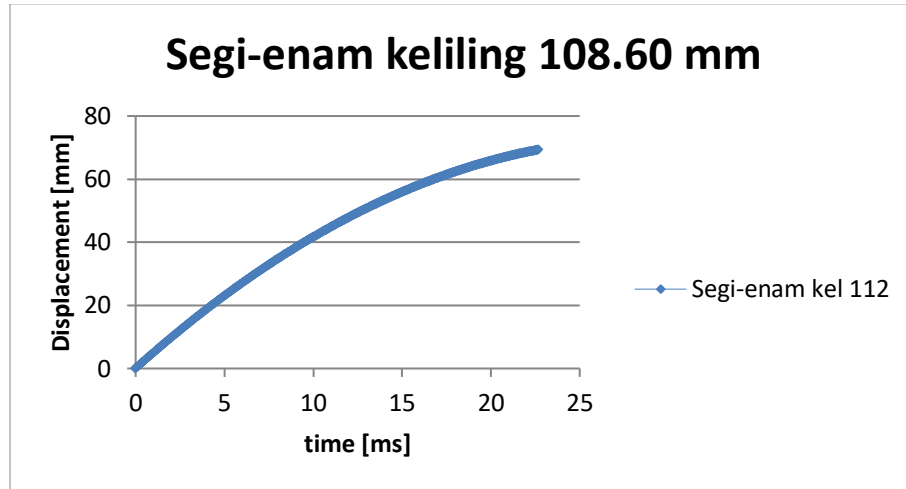
Misalkan dengan menggunakan contoh dari eksperimen tabung segi-enam dengan keliling 108.60 mm , Diketahui :

$$S = 69.30 \text{ mm} \quad v_0 = 4.96 \text{ m/s}$$

$$S_0 = 0 \quad t_{\text{total}} = 22.67 \text{ s}$$

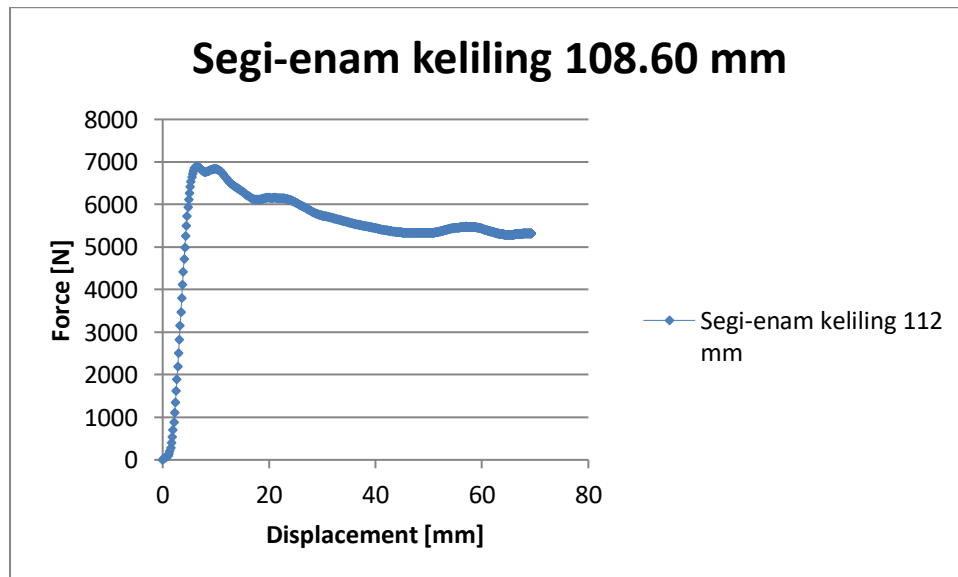
Sehingga dari persamaan 6.3 kita mendapat harga a yaitu : -0.17448 m/s^2 .

Harga a dimasukkan kedalam persamaan 6.3 kembali, dengan menggunakan selang waktu dari $t=0$, sampai $t =$ waktu total, sehingga kita mendapatkan pola *displacement* terhadap selang waktu total [Lihat gambar A-3.6].



Gambar A-3. 6 *Displacement* terhadap *Time*

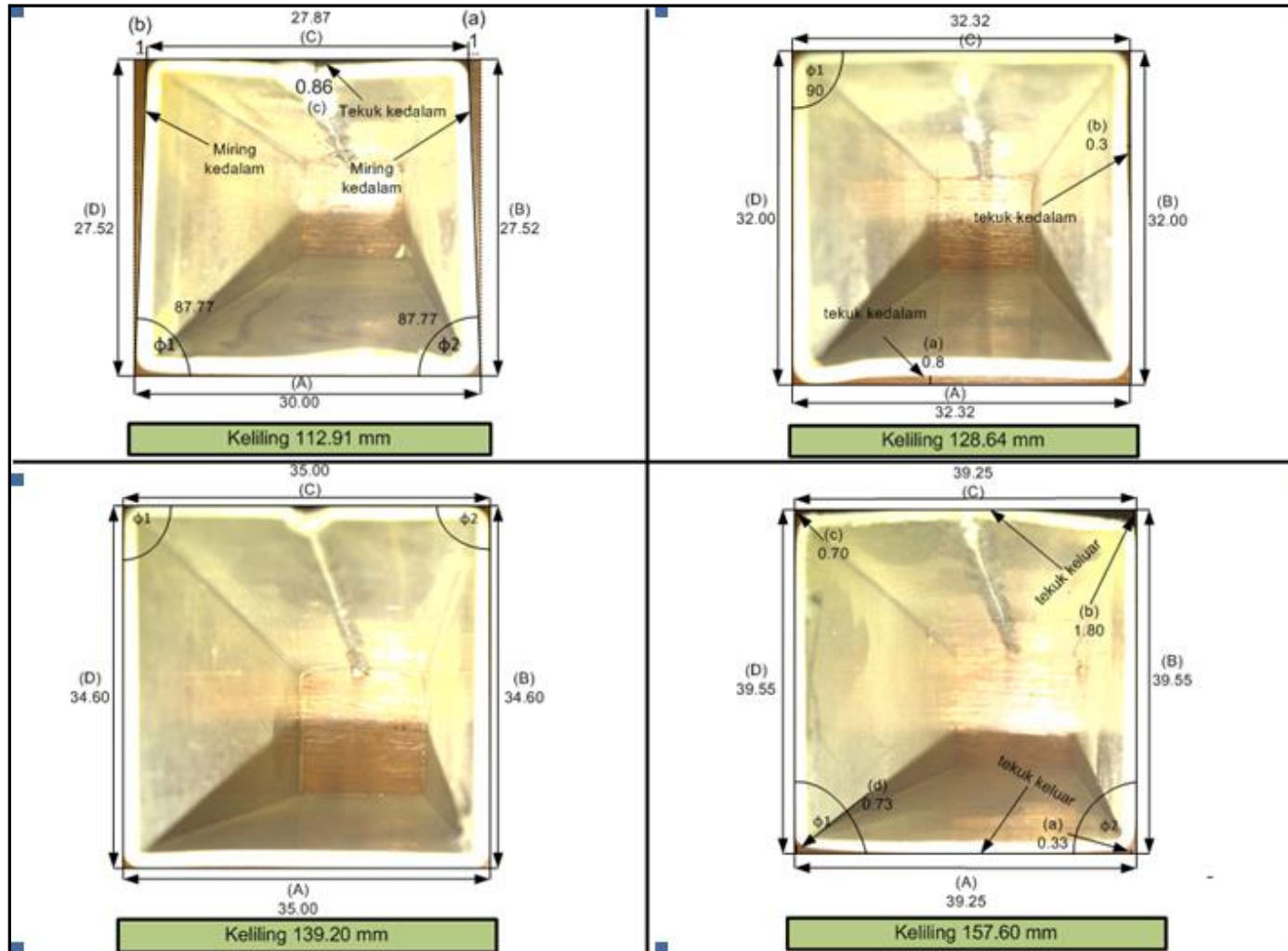
Sehingga dengan didapatkan harga *displacement* terhadap selang waktu , maka harga P_m yaitu *force* terhadap *displacement* pada suatu waktu juga dapat dicari.



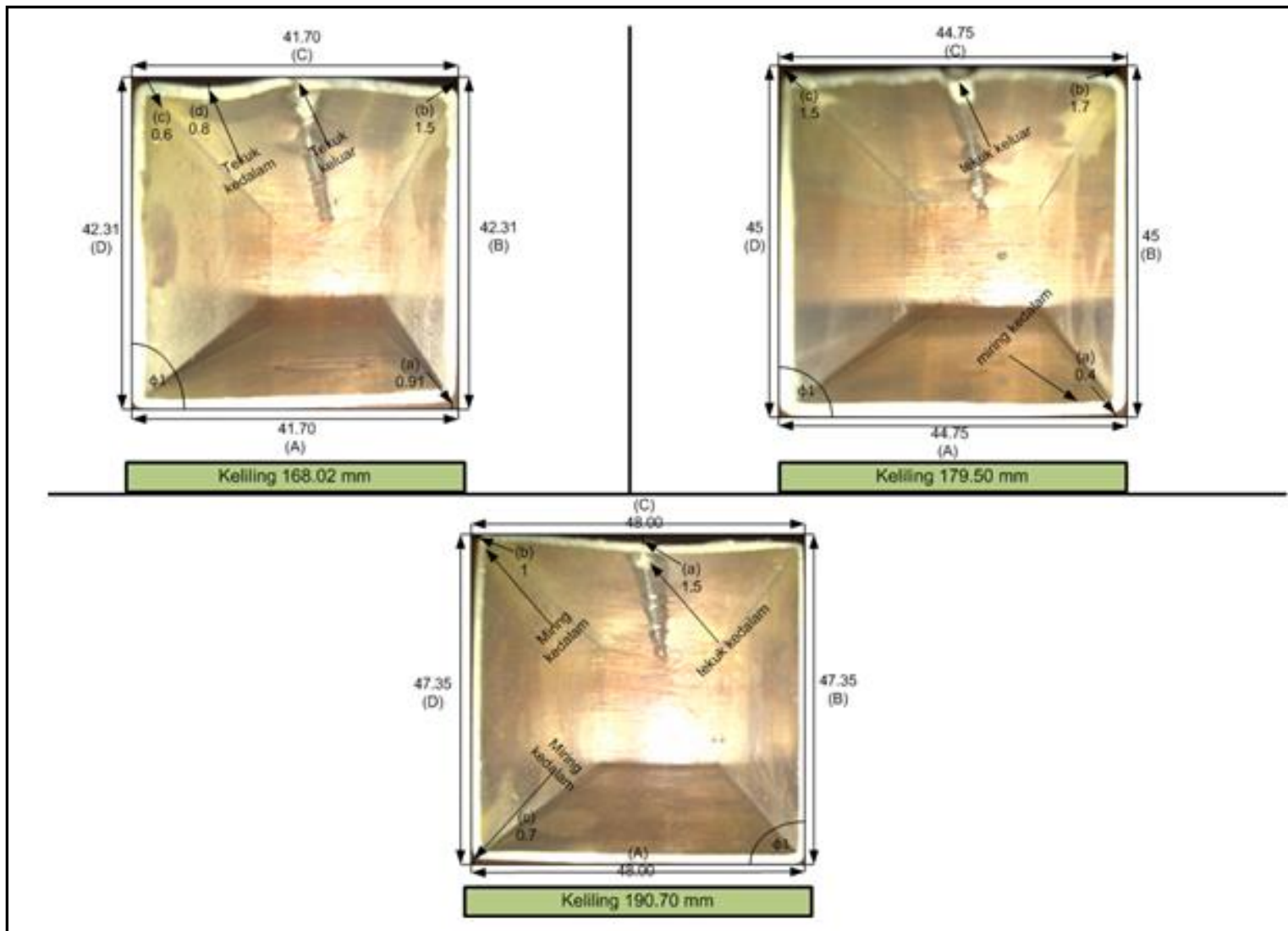
Gambar A-3. 7 *Force* terhadap *displacement*

Lampiran A- 4

Hasil pengukuran geometri penampang segi-empat



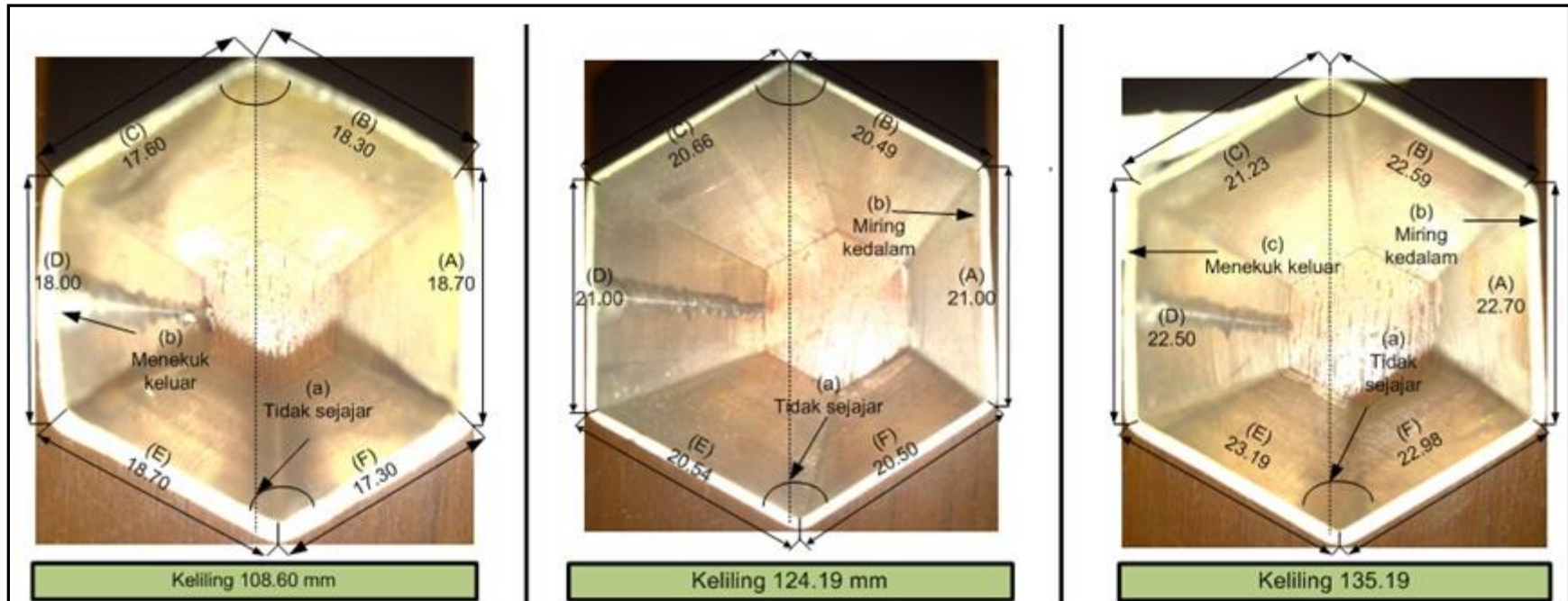
Note : Unit satuan milimeter (mm)



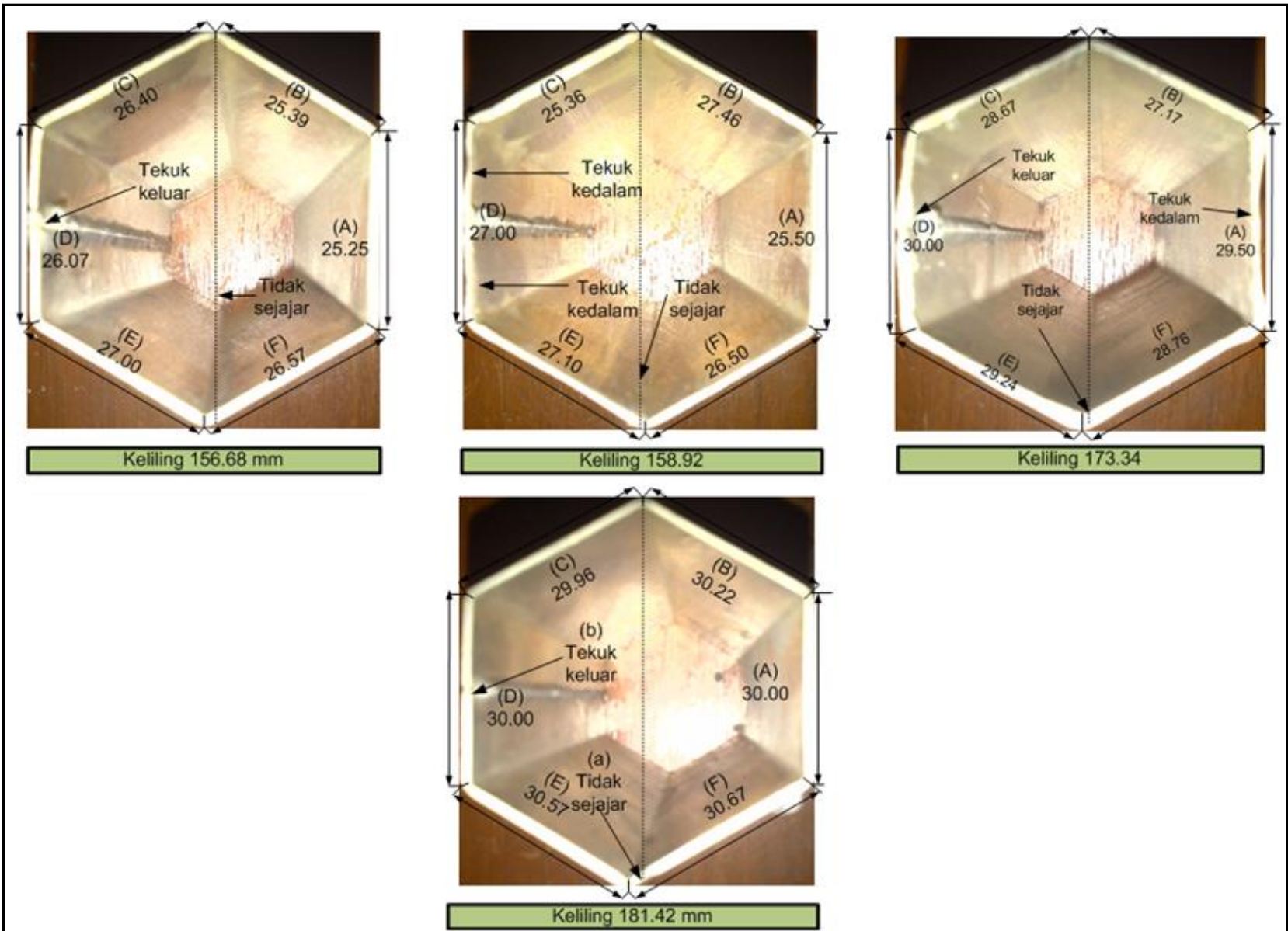
Note : Unit satuan milimeter (mm)

Lampiran A- 5

Hasil pengukuran geometri penampang segi-enam



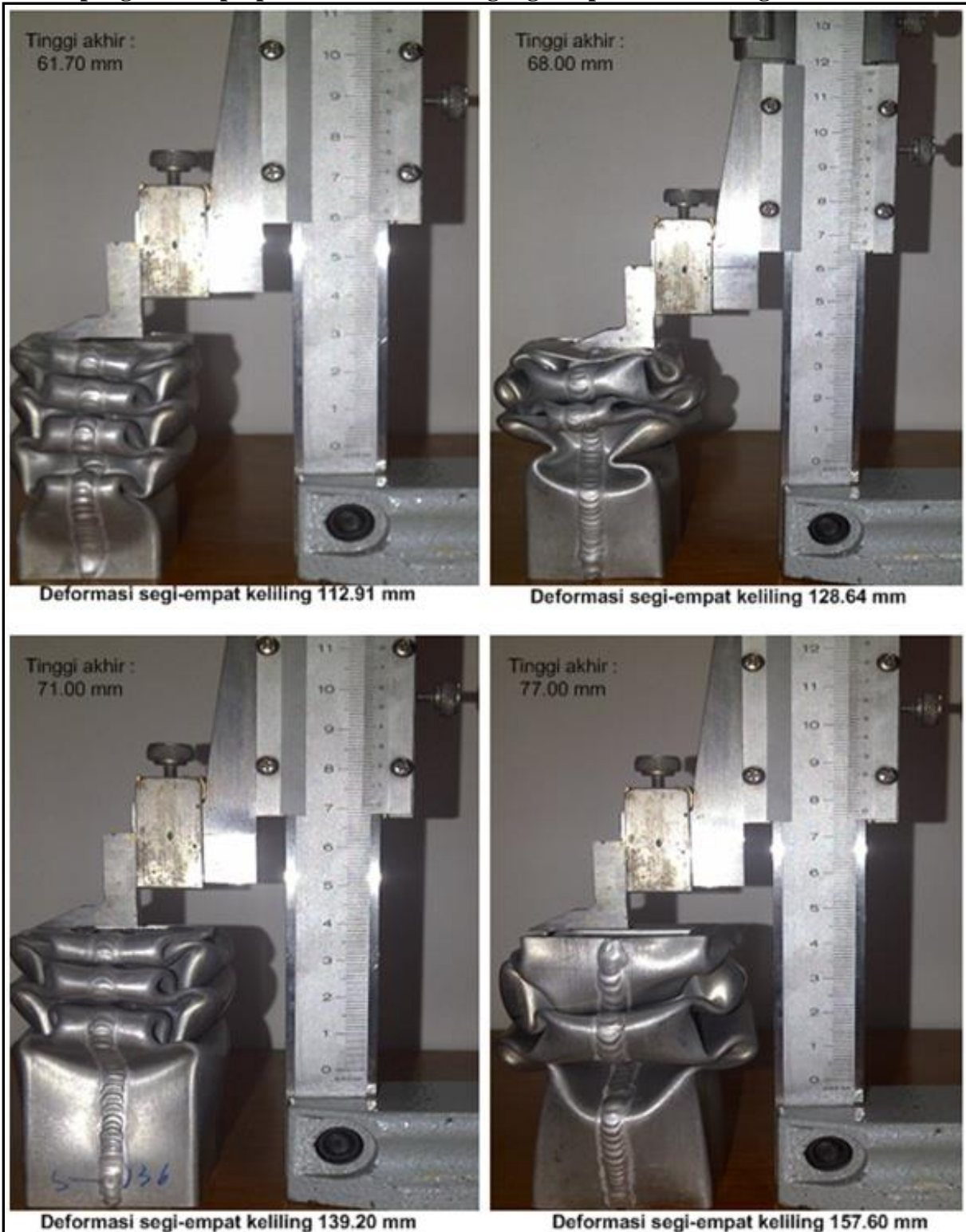
Note : Unit satuan milimeter (mm)

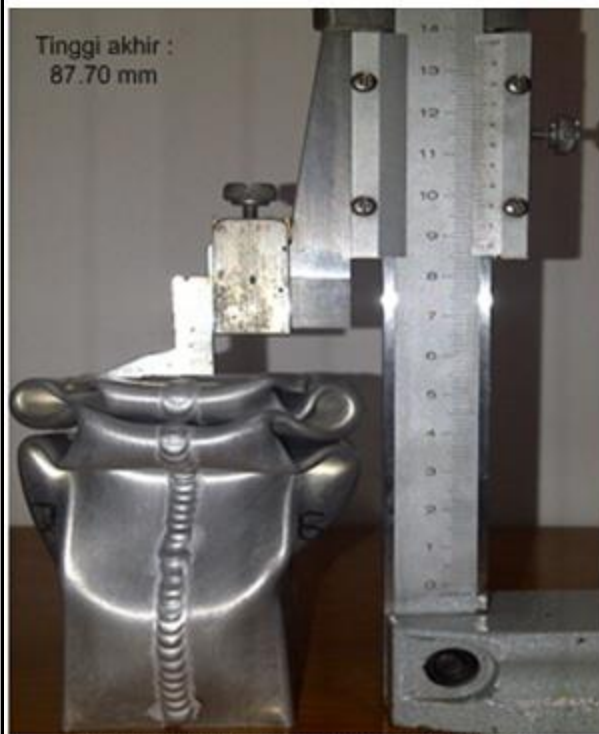


Note : Unit satuan milimeter (mm)

Lampiran A- 6

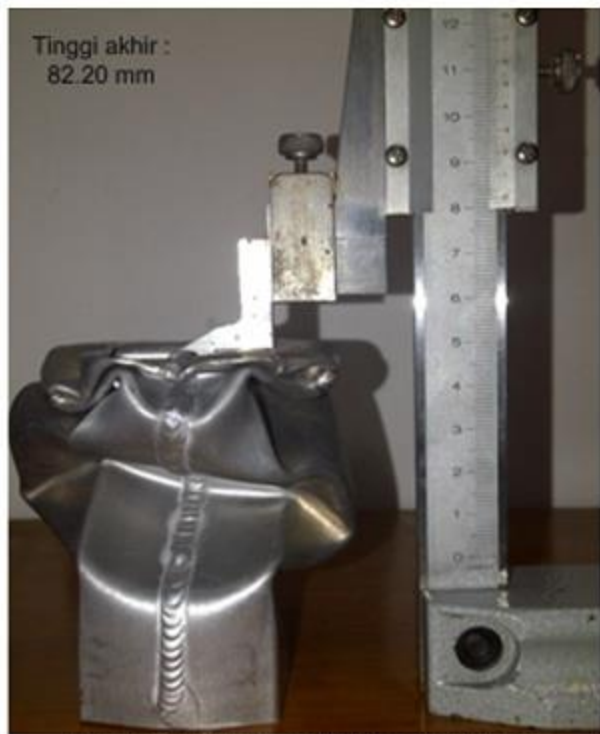
Hasil pengukuran perpindahan total tabung segi-empat setelah mengalami tumbukan





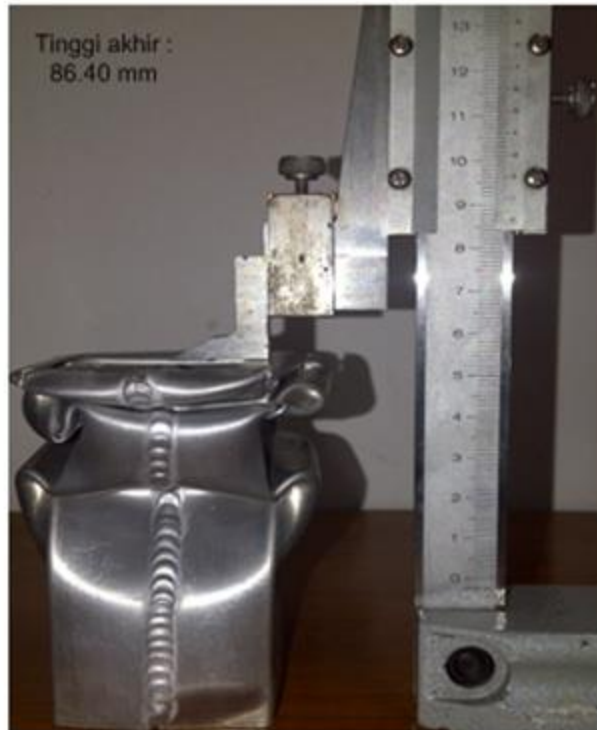
Tinggi akhir :
87.70 mm

Deformasi segi-empat keliling 168.02 mm



Tinggi akhir :
82.20 mm

Deformasi segi-empat keliling 179.50 mm

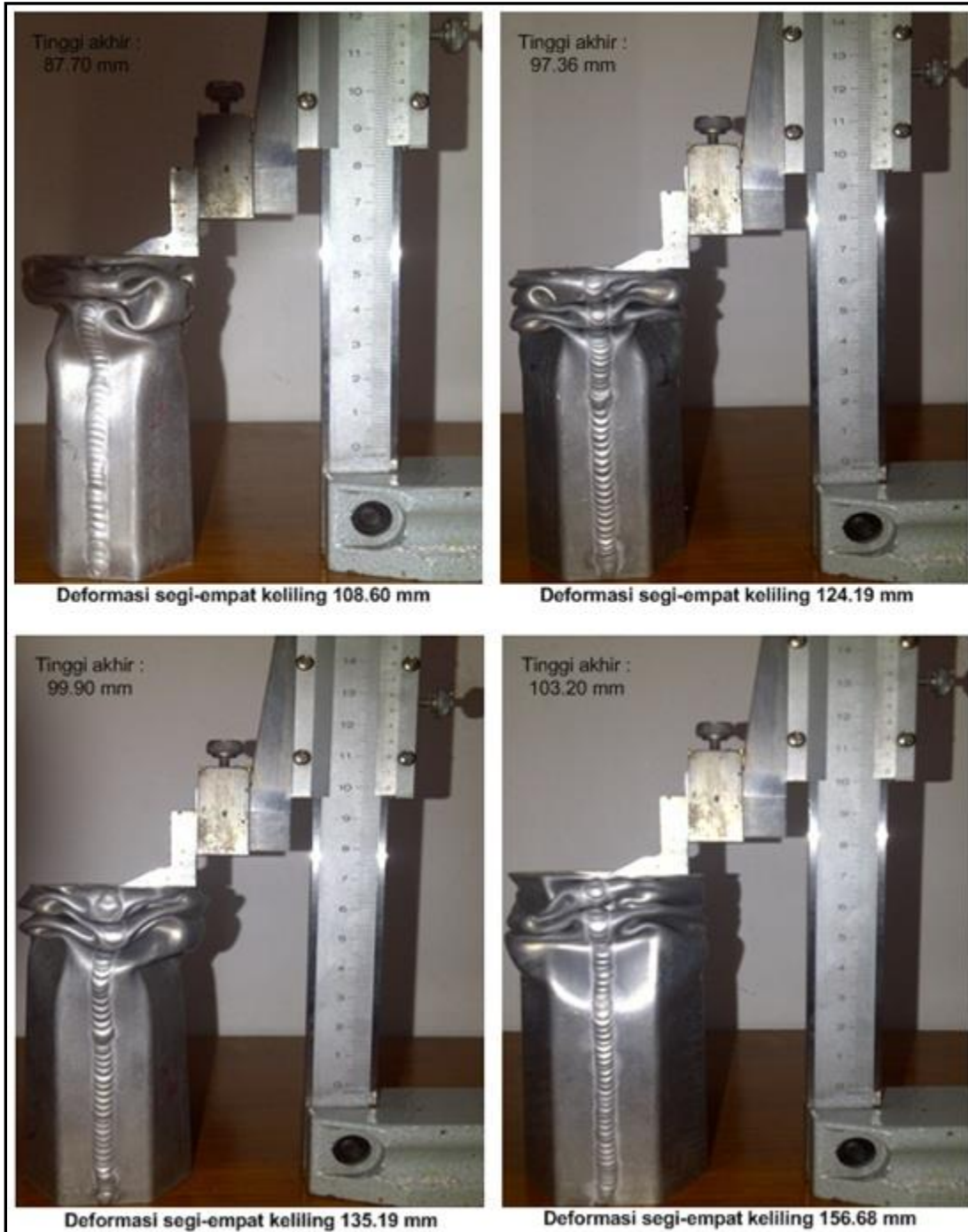


Tinggi akhir :
86.40 mm

Deformasi segi-empat keliling 190.70 mm

Lampiran A- 7

Hasil pengukuran perpindahan total tabung segi-enam setelah mengalami tumbukan

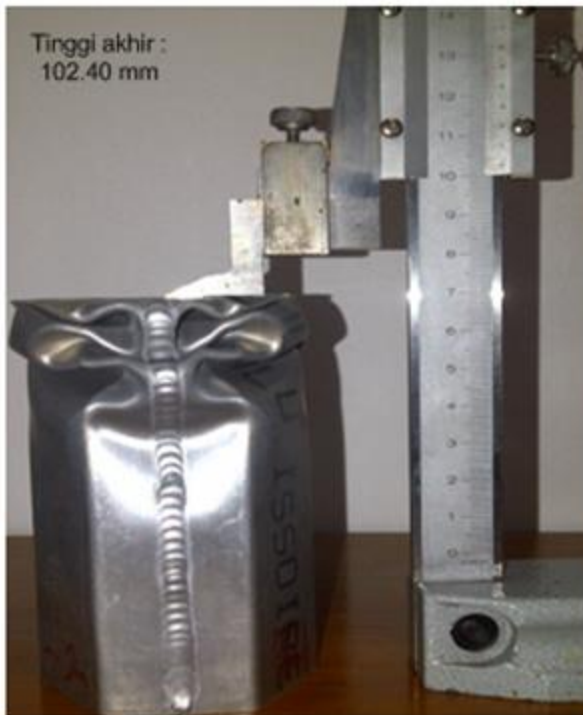




Deformasi segi-empat keliling 158.92 mm



Deformasi segi-empat keliling 173.34 mm



Deformasi segi-empat keliling 181.42 mm

