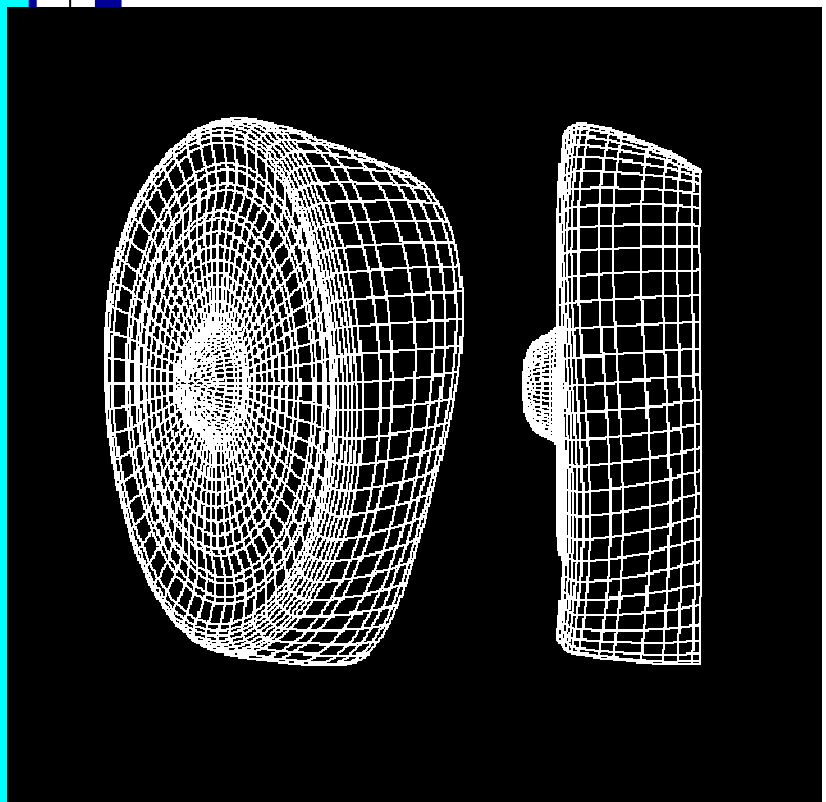


Jurnal Teknik Mesin
Volume 21, No.2, Oktober



EDITOR

B. Sutjiatmo (Ketua)
A. Suwono
D. Suharto
K. Bagiasna
S. D. Jenie
S. S. Brodjonegoro
Abdurrachim
I. Nurhadi
R. Suratman
P. S. Darmanto

MITRA BESTARI

Ign. P. Nurprasetio (ITB)
I. S. Putra (ITB)
A. I. Mahyuddin (ITB)
Y. Yuwana M (ITB)
Z. Abidin (ITB)
P. Sutikno (ITB)
T. Hardianto (ITB)
T. A. F. Soelaiman (ITB)
N. P. Tandian (ITB)
S. Wiryolukito (ITB)
A. Basuki (ITB)

REDAKSI PELAKSANA

A. D. Pasek (Ketua)
I M. Astina
I. G. N. W. Puja
Indrawanto
W. Adriansyah
A. Wibowo
I N. Diasta

ALAMAT REDAKSI

Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung
Jln. Ganesa 10, Bandung 40132
Tel. :(022)-2504243
Fax: (022)-2534099
E-mail: ari@termo.pauir.itb.ac.id
yadi@tu.ms.itb.ac.id

Terbit 2 (dua) kali dalam satu tahun
Bulan April dan Oktober.

EDITORIAL

Jurnal Mesin Vol. 21 No. 2 merupakan edisi terakhir tahun 2006. Lima makalah diterbitkan dalam Jurnal ini yang mencakup berbagai disiplin ilmu dalam bidang Teknik Mesin. Makalah pertama, ditulis oleh I Wayan Suweca dan Eko Cahyono dari Laboratorium Perancangan Mesin ITB. Makalah ini membahas pengaruh frekuensi pribadi gong terhadap kualitas bunyi yang dihasilkan. Usulan metode optimasi perancangan gong yang berdasar pada metode *Sequential Unconstrained Minimization Techniques* (SUMT) dan pemodelan elemen hingga dibahas dalam makalah. Hasil analisis yang diperoleh menunjukkan bahwa metode yang dikembangkan dapat menunjukkan bahwa daerah ujung bibir gong merupakan daerah yang paling berpengaruh terhadap kualitas suara yang dihasilkan.

Makalah kedua ditulis oleh Bagus Budiwantoro dkk. dari laboratorium Perancangan Mesin ITB. Makalah ini membahas metode analisis yang digunakan untuk memprediksi performansi bantalan luncur lokomotif yang mengalami beban impact. Beban impact dicurigai menjadi penyebab kegagalan pelumasan yang berakibat terjadinya kerusakan pada bantalan luncur. Untuk mengurangi frekuensi kegagalan, metode prediksi yang cukup akurat diperlukan metode yang diusulkan melibatkan parameter-parameter seperti ketebalan film minimum, eksentrisitas bantalan, koefisien gesek bantalan, laju aliran pelumas, peningkatan temperatur dan beban impact yang terjadi. Dari hasil analisis yang dilakukan pada bantalan luncur impor dan buatan lokal dapat diketahui beban impact kritik yang dapat diterima oleh bantalan tersebut.

Makalah yang ditulis oleh Prihadi Setyo Darmanto dari Laboratorium Teknik Pendingin ITB membahas mengenai masalah belum bakunya prosedur perancangan Kalsiner di beberapa pabrik semen. Hal ini menyebabkan besarnya variasi parameter serta ukuran kinerja antara satu desain dengan lainnya. Untuk mengatasi hal tersebut makalah ini mengusulkan beberapa parameter yang harus ditetapkan antara lain derajat kalsinasi. Derajat kalsinasi ini nantinya akan menentukan waktu tinggal, besarnya panas yang diperlukan, volume kalsiner, dan kecepatan aliran aerosol.

Makalah keempat ditulis oleh Bambang Kismono Hadi dkk. dari Kelompok Keahlian Struktur Ringan FTI ITB. Makalah ini membahas kaji eksperimental penyerapan energi oleh tabung aluminium yang mengalami beban tekan arah aksial. Kajian ini menyatakan tabung silinder yang terdeformasi plastis akibat beban aksial dapat digunakan sebagai komponen penyerap energi yang efisien. Pengujian pada silinder aluminium berdiameter 60 mm dan 100 mm, dan ketebalan 2 mm yang mendapat beban aksial mengalami kolaps berbentuk lipatan plastis teratur yang menunjukkan penyerapan energi yang cukup besar. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa penyerapan energi yang sebenarnya terjadi lebih besar dari prediksi teoritik.

Makalah kelima ditulis oleh Rachman Setiawan dkk. dari Kelompok Keahlian Perancangan Mesin FTI ITB. Makalah ini membahas hasil pengujian dan simulasi penyerapan energi pada modul penyerap energi impact. Modul yang dimaksud merupakan salah satu penerapan teknologi *crashworthiness* yang didefinisikan sebagai kemampuan suatu struktur untuk melindungi kargo atau penumpang ketika terjadi tabrakan (impact). Makalah ini membahas hasil-hasil simulasi dan kaji eksperimen kasus-kasus impact untuk memberi gambaran pengaruh beberapa parameter utama. Mekanisme penyerapan impact yang dicoba adalah *internal inversion* dan *controlled axial splitting*.

Akhir kata Redaksi mengucapkan selamat membaca semoga makalah-makalah dalam Jurnal Mesin memberi informasi dan pengetahuan yang bermanfaat.

MESIN

Jurnal Teknik Mesin

Vol. 21, No. 2, Oktober 2006

ISSN 0852-6095

Diterbitkan oleh : Program Studi Teknik Mesin,
Fakultas Teknologi Industri - ITB

Surat ijin : STT No. 964/DIT-JEN/PPG/STT/1982.

DAFTAR ISI

- Optimasi numerik struktur gong untuk memperoleh rasio frekuensi pribadi tertentu.*
I Wayan Suweca dan Eko Cahyono 34-43
- Aplikasi metode rainmondi dan boyd pada perbandingan analisis performansi journal bearing lokomotif yang mengalami beban impak.*
Bagus Budiwanto, Ridha Firmansyah dan IGN Wiratmaja Puja 44-52
- Perbandingan parameter desain dan parameter operasi beberapa kalsiner pabrik semen di Indonesia.*
Prihadi Setyo Darmanto 53-58
- Kaji eksperimental penyerapan energi tabung aluminium yang mengalami beban tekan arah aksial.*
Bambang K. Hadi, Ichsan S. Putra dan Yanyan Tedy S. 59-64
- Karakteristik modul penyerap energi impak mekanisme internal inversion dan axial splitting.*
Rachman Setiawan, M. Hisyam Amir, Bambang Sugiharto dan Sigit Fajrianto 65-72

M E S I N

Jurnal Teknik Mesin

Vol. 21, No. 2, Oktober 2006

ISSN 0856-6095

KAJI EKSPERIMENTAL PENYERAPAN ENERGI TABUNG ALUMINIUM YANG MENGALAMI BEBAN TEKAN ARAH AKSIAL

Bambang K. Hadi, Ichsan S. Putra dan Yanyan Tedy S.

Kelompok Keahlian Struktur Ringan – Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung
E-mail : bkhadi@ae.itb.ac.id

Abstrak

Komponen penyerap energi digunakan pada semua jenis kendaraan, seperti mobil, pesawat udara, trem, kapal laut dan modus angkutan lainnya. Tujuannya adalah untuk menyerap energi pada saat terjadi tumbukan untuk mengurangi resiko kecelakaan penumpang dan membatasi kerusakan pada struktur. Tabung silinder yang terdeformasi plastis karena dibebani dalam arah aksial merupakan komponen penyerap energi yang efisien. Dalam makalah ini dilakukan pengujian tekan dalam arah longitudinal pada spesimen tabung aluminium berdiameter 60 mm dan 100 mm, dengan ketebalan 2 mm. Beberapa jenis mekanisme pemicu kolaps diteliti, yaitu: pemicu lipatan plastis, pemicu lubang lingkaran dan pemicu lubang oval. Hasil eksperimen ini akan dibandingkan dengan kaji analitis.

Abstract

Energy absorbing structural components are widely used in vehicles, such as car, aircraft, train, ships and others. The aim is to absorb energy during impact and thus lessen the risk of occupant's injuries and limit the damage to the whole structure. Cylindrical shell that deform plastically due to longitudinal loading is one of the efficient energy absorbing structures. In this paper, experiments were carried out on aluminum cylindrical shell which was loaded axially. The diameters of the cylindrical shell were 60 mm and 100 mm, and the thickness was 2 mm. Some collapse trigger mechanisms were investigated, which are: plastic fold trigger, circular hole trigger and oval hole trigger. The experiments will then be compared with analytical results.

Keywords: *energy absorbing structures, cylindrical shell*

1. PENDAHULUAN

Struktur penyerap energi tumbukan sangat diperlukan pada struktur kendaraan, baik kendaraan darat, laut maupun udara. Struktur tersebut bertugas untuk menyerap sebagian besar energi ketika terjadi tumbukan untuk mengurangi resiko kecelakaan pada penumpang, dan kerusakan struktur secara keseluruhan. Struktur tabung silinder yang dibebani dalam arah aksial, merupakan struktur yang sering dipakai untuk menyerap energi tersebut. Apabila dirancang dengan baik, struktur tersebut mampu membentuk lipatan-lipatan plastis yang teratur, sehingga mampu menyerap energi secara maksimum.

Alexander [1] merupakan peneliti pertama yang melakukan kaji teoritis tentang tabung silinder yang mendapat beban aksial, berdasarkan pada keseimbangan kerja eksternal dan internal. Tabung silinder dimodelkan sebagai elemen garis lurus yang terlipat ke arah dalam

atau luar, melalui engsel plastis (*plastic hinge*) stasioner. Pendekatan ini kemudian disempurnakan oleh Abramovicz dan Jones [2,3] dengan memodelkan dinding tabung tidak lagi berbentuk garis lurus, tetapi melengkung. Grzebieta [5] menyempurnakan lagi bentuk lengkungan plastis, dan mendasarkan analisisnya pada keseimbangan gaya dan bukan keseimbangan kerja.

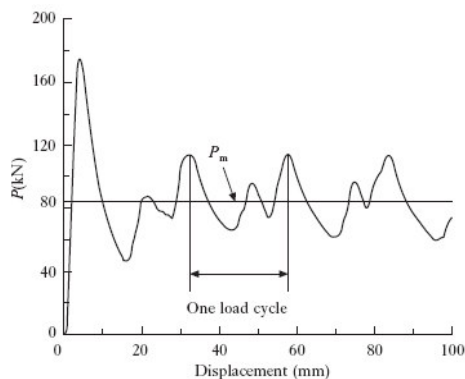
Wierzebicki *dkk* [6] menyampaikan bahwa pada pengamatannya, tabung akan melipat baik ke arah dalam maupun ke luar. Karena itu, mereka memperkenalkan parameter baru, yang dinamakan faktor eksentrisitas, m , yang merupakan perbandingan antara jumlah lipatan ke arah luar dan jumlah total lipatan. Dengan demikian, mereka dapat memprediksi bentuk kurva beban-deformasi; dan bukan hanya beban rata-rata. Hasil kerja mereka kemudian diperbaiki oleh Singace *dkk* [7,8].

Beberapa peneliti terus melakukan kajian mengenai hal ini. Huang dan Lu [9] melakukan kajian numerik, dengan menggunakan metode elemen hingga dan eksperimental, dan membandingkannya dengan model analitis yang mereka kembangkan. Borvik *dkk* [10] melakukan kaji numerik dan eksperimental pada tabung aluminium, baik yang kosong maupun yang terisi aluminium *foam*, dengan beban aksial maupun menyamping (*oblique*). Hsu dan Jones [11] melakukan kajian dengan beban statik maupun dinamik pada tabung baja, baja sedang maupun aluminium.

Salah satu aspek penting dalam struktur penyerap energi tumbukan ini adalah adanya mekanisme pemicu kolaps (*collapse trigger mechanism*). Pemicu ini bertugas untuk: (a) menurunkan beban puncak (*peak force*) tumbukan yang dapat mencederai penumpang, dan (b) menjaga agar kolaps berbentuk stabil, dengan lipatan teratur. Apabila struktur tidak mempunyai pemicu kolaps ini, sering modulus kolaps menjadi tidak teratur dan modulus keruntuhan berubah menjadi modulus tekuk (*overall buckling*) [4]. Karena itu dalam makalah ini, pada struktur tabung dipasang pemicu kolaps, berbentuk lipatan platis, lubang lingkaran dan lubang oval. Hasil eksperimen ini akan dibandingkan kaji analitis.

2. PENDEKATAN ANALITIS

Suatu tabung yang mendapat beban aksial dengan bahan elastis platis akan mengalami lipatan secara teratur, dengan bentuk kurva beban-deformasi seperti diberikan pada Gambar 1. Besar beban akan berfluktuasi sepanjang deformasi. Beban puncak akan bergantung pada beban tekuk elastik-plastik dan beban tersebut dapat diturunkan dengan menggunakan mekanisme pemicu kolaps.



Gambar 1. Bentuk kurva beban-deformasi pada tabung metal yang mendapat beban aksial [9].

Dari kurva tersebut, dapat diperoleh parameter yang penting yaitu gaya peruntahan rata-rata (*mean crushing force*), P_m . Beban ini sering diberikan dalam bentuk P_m / M_0 , di mana $M_0 = \sigma_0 t^2 / 4$, adalah momen tekuk plastik per satuan panjang; dan σ_0 dan t masing-masing adalah tegangan alir (*flow stress*) dan tebal tabung. Pada kasus ini diasumsikan bahwa nilai σ_0 adalah 95% dari tegangan *ultimate* (σ_u) bahan [9].

Besar beban rata-rata peruntahan diberikan pada persamaan-persamaan berikut ini:

Alexander (1960):

$$\frac{P_m}{M_0} = 20,73 \left(\frac{D}{t} \right)^{0,5} + 6,283 \quad (1)$$

Abramovicz & Jones (1984):

$$\frac{P_m}{M_0} = 20,79 \left(\frac{D}{t} \right)^{0,5} + 11,90 \quad (2)$$

Wierzbicki, *dkk* (1992):

$$\frac{P_m}{M_0} = 22,77 \left(\frac{D}{t} \right)^{0,5} \quad (3a)$$

untuk engsel plastis tidak bergerak, dan:

$$\frac{P_m}{M_0} = 31,74 \left(\frac{D}{t} \right)^{0,5} \quad (3b)$$

untuk engsel plastis bergerak.

Singace, *dkk* (1995):

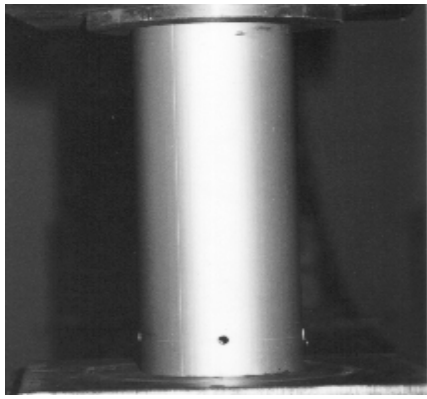
$$\frac{P_m}{M_0} = 22,27 \left(\frac{D}{t} \right)^{0,5} + 5,632 \quad (4)$$

D adalah diameter rata-rata tabung.

3. KAJI EKSPERIMENTAL

Percobaan dilakukan pada tabung aluminium berkekuatan rendah yang ada di pasaran, dengan diameter 60 mm dan 100 mm dan ketebalan 2 mm. Dari uji tarik yang dilakukan dengan menggunakan bahan yang sama didapat tegangan luluh (σ_y) rata-rata adalah 141,23 MPa pada tabung diameter 60 mm dan 142 MPa pada tabung diameter 100 mm. Tegangan *ultimate*-nya (σ_u) adalah 169,75 MPa dan 174,86 masing-masing untuk tabung berdiameter 60 dan 100 mm.

Sebelum melakukan uji tekan, tabung diberi pemicu kolaps berbentuk lipatan plastis buatan, lubang lingkaran dan lubang oval. Pengujian dilakukan dengan menggunakan mesin uji serba-guna Dartec, yang terdapat di Laboratorium Struktur Ringan dan Aerodinamika, PAU-Ilmu Rekayasa ITB. Pembebanan dilakukan secara kuasi-statik dengan dengan kecepatan 1 cm/menit. Gambar 2 menunjukkan pemasangan tabung pada mesin uji.



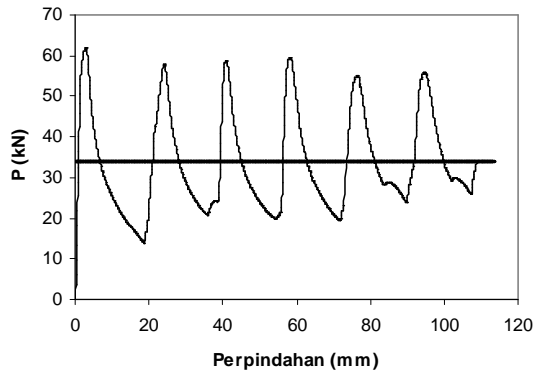
Gambar 2. Pemasangan tabung pada mesin uji. Terlihat pemicu kolaps berbentuk lubang lingkaran di bagian bawah specimen.

Hasilnya diberikan dalam kurva-kurva sebagai berikut:

3.1 Tabung Diamater 60 mm

3.1.1 Pemicu Berbentuk Lubang Lingkaran

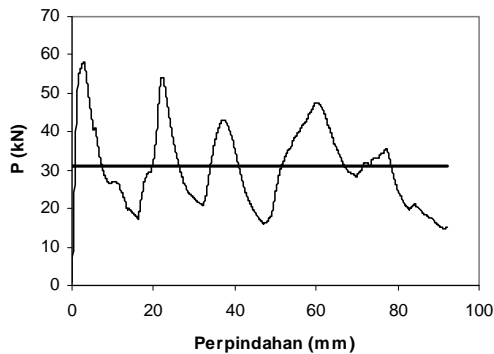
Kurva hasil uji beban-deformasi untuk tabung berdiameter 60 mm dengan pemicu berbentuk lubang lingkaran diberikan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Kurva beban-deformasi tabung aluminium berdiameter 60 mm dengan pemicu lubang lingkaran.

3.1.2 Pemicu Berbentuk Lubang Oval

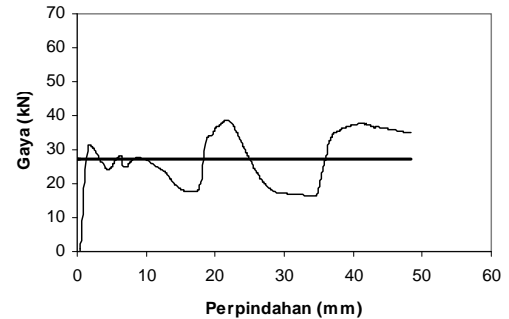
Hasil uji diberikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva beban-deformasi tabung aluminium berdiameter 60 mm dengan pemicu berbentuk lubang oval.

3.1.3 Pemicu Berbentuk Lipatan Plastis

Hasil uji diberikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Kurva beban-deformasi tabung aluminium berdiameter 60 mm dengan pemicu berbentuk lipatan plastis.

Gambar spesimen setelah mengalami pengujian dapat dilihat pada Gambar 6 dan 7.



(a) tampak samping



(b) tampak atas

Gambar 6. Spesimen hasil uji dengan pemicu berbentuk lubang lingkaran (kiri) dan lubang oval (kanan).

Gambar 6 menunjukkan bahwa lipatan teratur terjadi pada pemicu berbentuk lingkaran. Gambar 7 menunjukkan hasil pengujian untuk pemicu berbentuk lipatan plastis.



(a) tampak samping

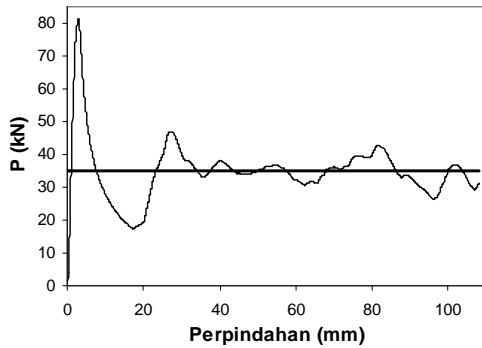


(b) tampak atas

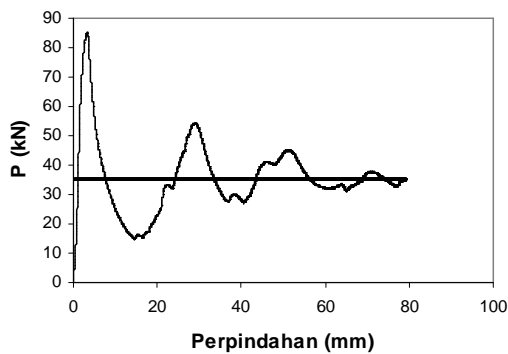
Gambar 7. Spesimen hasil uji tabung aluminium berdiameter 60 mm dengan pemicu berbentuk lipatan plastis.

3.2. Tabung Diameter 100 mm

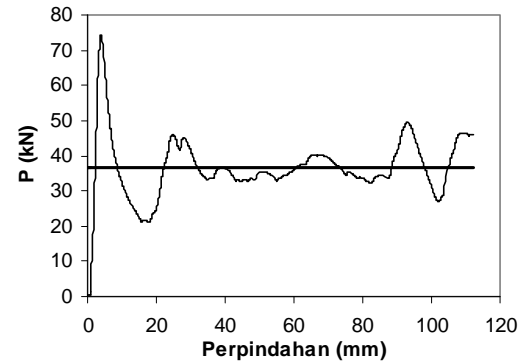
Hasil yang sama untuk tabung berdiameter 100 mm diberikan pada Gambar 8-12.



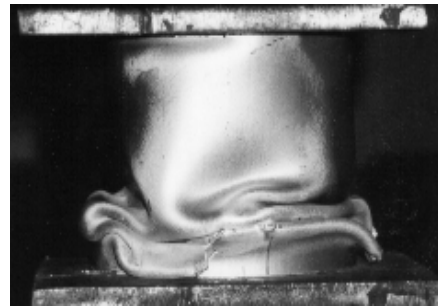
Gambar 8. Kurva beban-deformasi tabung aluminium berdiameter 100 mm dengan pemicu lubang lingkaran.



Gambar 9. Kurva beban-deformasi tabung aluminium berdiameter 100 mm dengan pemicu lubang oval.



Gambar 10. Kurva beban-deformasi tabung aluminium berdiameter 100 mm dengan pemicu lipatan plastis.



Gambar 11. Spesimen tabung aluminium diameter 100 mm dengan pemicu lubang lingkaran dalam pengujian.



Gambar 12. Hasil uji specimen dengan pemicu berbentuk lipatan plastis (kiri) dan lubang oval (kanan).

4. ANALISIS

Dari hasil percobaan yang dilakukan di atas terlihat bahwa spesimen tabung aluminium mengalami kolaps

secara teratur dalam arah pembebanan aksial. Meskipun demikian, terjadi perbedaan yang cukup penting mengenai bentuk lipatan plastis yang terjadi.

Pendekatan analitis mengasumsikan bahwa lipatan yang terjadi berbentuk teratur, dalam bentuk lingkaran, dalam arah aksial dan sirkumferensial.

Pada kenyataannya, bentuk lipatan plastis terjadi tidak teratur, bahkan beberapa spesimen membentuk lipatan tajam, berbentuk segitiga atau heksagonal; seperti yang terjadi pada spesimen dengan pemicu lipatan plastis dan lubang oval.

Bentuk yang tidak teratur tersebut terjadi, karena kondisi batas bebas di ujung-ujung tabung. Dengan demikian, engsel plastis dapat bergerak bebas selama pembebanan.

Secara umum, hasil percobaan menunjukkan beban P_m yang lebih besar dibanding perhitungan teoritis. Hal ini menunjukkan bahwa energi yang dapat diserap struktur tabung selama percobaan lebih besar dibanding perkiraan teoritisnya. Meskipun demikian, perhitungan teoritis yang dikemukakan di sini dapat digunakan sebagai awal prediksi penyerapan energi struktur tabung yang mendapat beban aksial.

Tabel 1. Perbandingan Beban Peruntuhan Rata-Rata, P_m (dalam kN), antara Percobaan dan Analitis untuk Diameter Tabung 60 mm.

Jenis Pemicu	Hasil Percobaan	Alexander [1]	Abramowicz [2]	Wierzbicki ⁽¹⁾ [6]	Wierzbicki ⁽²⁾ [6]	Singace [7]
Lubang lingkaran	34,06	19,35	20,31	20,14	28,08	20,61
Lubang oval	30,95					
Lipatan plastis	27,06					

⁽¹⁾ asumsi engsel plastis tidak bergerak

⁽²⁾ asumsi engsel plastis bergerak

Tabel 2. Perbandingan Beban Peruntuhan Rata-Rata, P_m (dalam kN), antara Percobaan dan Analitis untuk Diameter Tabung 100 mm.

Jenis Pemicu	Hasil Percobaan	Alexander [1]	Abramowicz [2]	Wierzbicki ⁽¹⁾ [6]	Wierzbicki ⁽²⁾ [6]	Singace [7]
Lubang lingkaran	34,79	24,69	25,66	26,00	36,25	26,34
Lubang oval	35,51					
Lipatan plastis	34,08					

⁽¹⁾ asumsi engsel plastis tidak bergerak

⁽²⁾ asumsi engsel plastis bergerak

Perbandingan beban peruntuhan rata-rata (mean crushing load), P_m , antara hasil percobaan dengan perhitungan analitis, diberikan pada Tabel 1 dan 2, masing-masing untuk tabung berdiameter 60 dan 100 mm. Dari tabel tersebut terlihat bahwa pada umumnya terdapat perbedaan yang cukup besar antara hasil percobaan dan perhitungan analitis, kecuali pada perhitungan analitis berdasarkan Wierzbicki (1992) untuk kasus engsel plastis yang bergerak. Hal ini memang terlihat selama percobaan, seperti terlihat pada spesimen yang telah mengalami uji coba, seperti pada Gambar 6, 7, 11 dan 12. Gambar-gambar tersebut menunjukkan bahwa pada ujung tabung, terjadi perubahan bentuk, yang tidak lagi berbentuk lingkaran yang mengalami plastisitas, tetapi berbentuk tidak teratur, seperti segitiga maupun heksagonal.

5. KESIMPULAN

Dari hasil percobaan ini dapat disimpulkan bahwa tabung silinder yang mendapat beban aksial akan mengalami kolaps berbentuk lipatan plastis secara teratur. Lipatan plastis yang stabil tersebut merupakan unsur penting dalam penyerapan energi. Suatu mekanisme pemicu kolaps perlu diberikan pada struktur tabung tersebut untuk menurunkan beban puncak dan memicu terjadinya kolaps plastis yang teratur.

Secara umum, struktur yang dicoba mampu menyerap energi lebih besar dibanding prediksi teoritis. Prediksi yang dilakukan oleh Wierzbicki [6] dengan asumsi engsel plastis bergerak, mendekati hasil percobaan.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. J.M. Alexander, An approximate analysis of collapse of thin-walled cylindrical shells under axial loadings, *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, vol. 13, pp. 10-15, 1960.
2. W. Abramowicz dan N. Jones, Dynamic axial crushing of circular tubes, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 2, pp. 263-281, 1984.
3. W. Abramowicz dan N. Jones, Dynamic progressive buckling of circular and square tubes, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 4, pp. 243-269, 1986.
4. N. Jones., *Structural Impact*, Cambridge University Press, London, 1989.
5. R.H. Grzebieta, An alternative method for determining behavior of round stocky tubes subjected to axial crush loads, *Thin Walled Structures*, vol. 9, pp. 66-89, 1990.
6. T. Wierzbicki, S.U. Bhat, W. Abramowicz, dan D. Brodtkin, Alexander revisited – a two folding element model of progressive crushing of tubes, *International Journal of Solid Structures*, vol. 29, pp. 3269-3288, 1992.
7. A.A. Singace, H. Elsobky dan T. Y. Reddy, On the eccentricity factor in the progressive crushing of tubes, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 32, pp. 3589-3602, 1995.
8. A.A. Singace dan H. Elsobky, Further experimental investigations on the eccentricity factor in the progressive crushing of tubes, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 33, pp. 3517-3538, 1996.
9. X. Huang dan G. Lu, Axisymmetric progressive crushing of circular tubes, *International Journal of Crashworthiness*, vol. 8, no.1, pp. 87-95, 2003.
10. T. Borvik, O.S. Hopperstad, A. Reyes, M. Langseth, G. Solomos dan T. Dyngeland, Empty and foam-filled aluminum tubes subjected to axial and oblique quasi-static loading, *International Journal of Crashworthiness*, vol. 8, no.5, pp. 481-494, 2003.
11. S.S. Hsu dan N. Jones, Quasi-static and dynamic axial crushing of thin-walled circular stainless steel, mild steel and aluminum alloy tubes, *International Journal of Crashworthiness*, vol. 9, no.2, pp. 195-217, 2004.