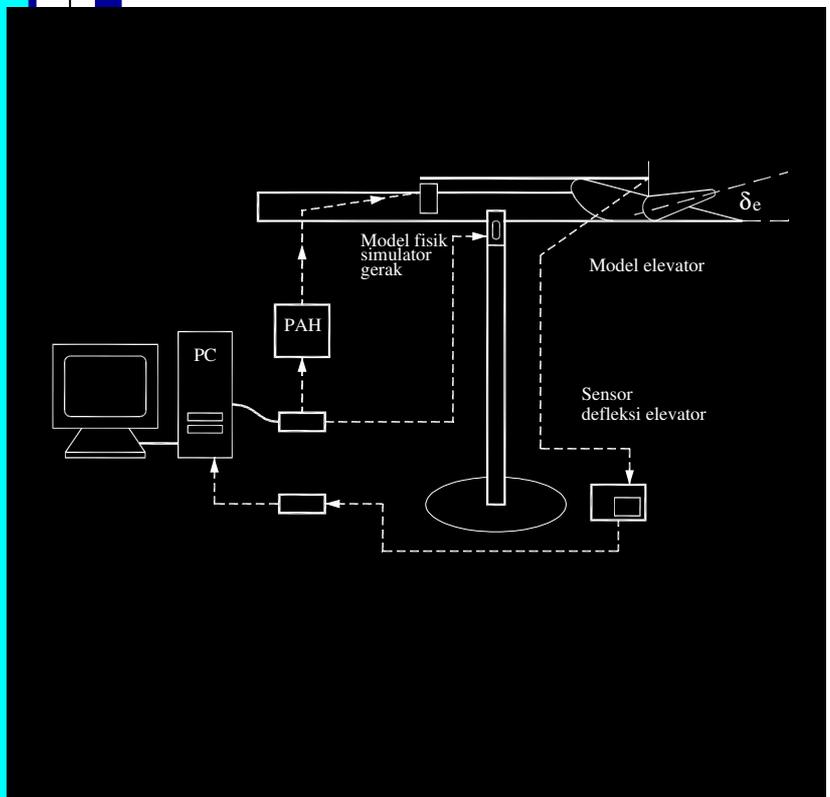


Jurnal Teknik Mesin
Volume 22, No.1, April 2007

W
E
S
E
W



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

Makalah pertama pada Jurnal Mesin Volume 22 No. 1 ditulis oleh Bambang Widyanto dan Achmad Sambas dari Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Bandung. Makalah ini membahas mengenai perlakuan panas (*solution treatment*) pada baja mangan austenitik. Proses perlakuan diberikan dengan mengoptimalkan temperatur pemanasan, dan waktu penahanan. Pemeriksaan terhadap hasil perlakuan dilakukan melalui pengamatan struktur mikro dan uji kekerasan. Baja mangan hasil perlakuan ini mempunyai keuletan yang lebih tinggi dan tingkat ketahanan aus yang memadai.

Makalah kedua yang berjudul Optimasi Pelapisan Material Peredam Viskoelastik pada Struktur Pelat Elastik yang ditulis oleh I Wayan Suweca dan Mokhammad Nuriman Yusuf dari Fakultas Teknologi Industri ITB. Metode optimasi yang digunakan merupakan modifikasi dari algoritma SUMT (*Sequential Unconstrained Minimization Technique*). Dari hasil kajian diketahui bahwa distribusi optimum lapisan material viskoelastik pada material elastik sangat dipengaruhi oleh jenis tumpuan struktur dan jumlah modus getar yang dilibatkan dalam analisis.

Indra Herlamba Siregar dari Universitas Negeri Surabaya, dan Abdul Muis dari Politeknik Samarinda, menulis makalah ketiga yang berjudul Karakteristik Aerodinamis Dua Silider Teriris Type 1 yang Tersusun *Side by Side* pada Bilangan Reynolds Subkritis. Makalah ini berisi hasil-hasil pengamatan terhadap kondisi aliran fluida yang melintasi sepasang silinder teriris. Besaran-besaran yang dimati antara lain distribusi koefisien *drag*, dan distribusi koefisien tekanan.

Makalah keempat berjudul Kaji Numerik dan Eksperimental Penyerapan Energi Tabung Aluminium Bergalur dengan Beban Aksial ditulis oleh Bambang K. Hadi et al dari Kelompok Keahlian Struktur Ringan Fakultas Teknologi Industri ITB. Makalah ini berisi kajian kemungkinan penggunaan tabung aluminium bergalur sebagai komponen penyerap energi. Kajian dilakukan baik dengan menggunakan pendekatan analitis, numerik dengan dinamik eksplisit ABAQUS dan pengujian. Hasilnya menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah galur semakin kecil beban peruntuhan rata-rata. Beban peruntuhan rata-rata hasil pengujian yang diperoleh selalu lebih besar dari hasil prediksi secara analitis maupun numerik.

Makalah terakhir berjudul Pembuatan dan Pengujian Sensor Ultrasonik Sebagai *Feedback* pada Sistem Kendali Otomatik *Pitch Attitude Hold* ditulis oleh U.M. Zaeny dari Fakultas Teknologi Industri ITB. Makalah ini membahas mengenai hasil-hasil uji coba penggunaan sensor jarak ultrasonik yang diusulkan untuk digunakan sebagai alternatif pengganti *static tube* yang biasa digunakan. Usulan penggantian ini dilakukan berdasarkan pertimbangan bahwa *static tube* tidak bekerja cukup akurat untuk wahana yang terbang hanya beberapa meter dari permukaan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor ultrasonik dapat diandalkan sebagai sensor jarak.

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

MESIN

Jurnal Teknik Mesin

Vol. 22, No. 1, April 2007

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

Pengaruh waktu austenitisasi pada proses pelarutan karbida baja mangan austenitik.

Bambang Widyanto dan Achmad Sambas

1-8

Optimasi pelapisan material peredam viskoelastik pada struktur pelat elastik

I Wayan Suweca dan Mokhamad Nuriman Yusuf

9-20

Karakteristik aerodinamis dua silinder teriris type 1 yang tersusun side by side pada bilangan Reynolds subkritis.

Indra Herlamba Siregar dan Abdul Muis

21-28

Kaji numerik dan eksperimental penyerapan energi tabung aluminium bergalur dengan beban aksial.

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

29-34

Pembuatan dan pengujian sensor ultrasonik sebagai feedback pada sistem kendali otomatis pitch attitude hold.

U.M. Zaeny, T. Indriyanto dan H. Muhammad

35-43

M E S I N

Jurnal Teknik Mesin

Vol. 22, No. 1, April 2007

ISSN 0856-6095

KAJI NUMERIK DAN EKSPERIMENTAL PENYERAPAN ENERGI TABUNG ALUMINIUM BERGALUR DENGAN BEBAN AKSIAL

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

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

Abstrak

Tabung bergalur yang mendapat beban aksial sering dipakai sebagai komponen penyerap energi yang efisien. Penyerapan energi dilakukan menggunakan lipatan plastis yang terbentuk pada saat dilakukan pembebanan. Pada makalah ini akan dikaji perilaku penyerapan energi tabung aluminium bergalur yang mendapat beban aksial. Diameter tabung adalah 100 mm, dengan tebal 2 mm dan panjang tabung 72 mm, serta jumlah galur 3 dan 7. Masing-masing galur mempunyai kedalaman 1 mm. Kajian dilakukan baik dengan menggunakan pendekatan analitik, numerik dengan dinamik eksplisit ABAQUS dan percobaan. Hasilnya menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah galur akan menyebabkan beban peruntuhan rata-rata, P_m , menurun. Kaji numerik dengan tepat dapat memprediksi bentuk akhir lipatan plastis, dan hasilnya sesuai dengan hasil percobaan. Perbedaan P_m antar ketiga metode tersebut bervariasi, antara 1 – 20%. Kajian lebih lanjut diperlukan untuk mengurangi perbedaan tersebut. Pada semua kajian, beban peruntuhan rata-rata hasil percobaan selalu lebih besar dibanding hasil analitik maupun numerik.

Abstract

Grooved tubes under axial compression are widely used as efficient energy absorption structures. The energy absorption uses plastic folding mechanisms that are formed during the loading. In this paper, the behaviors of grooved tubes under axial compression loading are discussed. The diameter of the tubes is 100 mm, with 2 mm thickness and the length is 72 mm. The number of grooves is 3 and 7, with the groove's depth is 1 mm. The study uses analytical method, numerical method using explicit dynamic of ABAQUS as well as experimental methods. The results show that increasing the number of grooves will reduce the mean crushing load, P_m . The numerical analysis is able to predict precisely the final plastic folding form of the tubes compared to the experimental results. The difference of P_m among the three methods varies between 1 – 20%. Further investigation is needed to reduce the differences. In all the studies conducted here, the mean crushing loads of the experimental data are always greater than both numerical and analytical methods.

Keywords : *energy absorbing structures, grooved tubes.*

1. PENDAHULUAN

Struktur tabung yang mendapat beban arah aksial merupakan salah satu bentuk struktur penyerap energi tumbukan yang efisien. Struktur ini memanfaatkan lipatan plastis yang terjadi pada dinding tabung sebagai mekanisme utama penyerap energi. Apabila dirancang dengan baik, struktur ini mampu memberikan lipatan plastis yang teratur di sepanjang tabung, sehingga mampu menyerap energi secara maksimum.

Berbagai peneliti telah meneliti hal tersebut. Alexander [1] merupakan peneliti pertama yang memperkenalkan konsep engsel plastis (*plastic hinge*) pada tabung silinder

yang mendapat beban aksial. Engsel plastis yang semula diasumsikan sebagai garis lurus, oleh Abramovicz dan Jones [2,3] diasumsikan sebagai garis lengkung. Hal ini kemudian disempurnakan lagi oleh Grzebieta [4], dengan mengambil konsep keseimbangan gaya, dan bukan keseimbangan kerja. Wierzebicki et al [5], memperkenalkan faktor eksentrisitas sebagai hasil pengamatannya bahwa lipatan plastis dapat melipat ke dalam maupun ke luar, sehingga dengan memperkenalkan konsep ini, mereka dapat memprediksi kurva beban-deformasi, dan bukan hanya beban rata-rata saja. Konsep ini disempurnakan oleh Singace [6,7]. Huang dan Lu [8] melakukan kaji numerik dan membandingkannya dengan hasil analitis.

Salah satu buku yang secara komprehensif membahas masalah tumbukan ini dibuat oleh Jones [9].

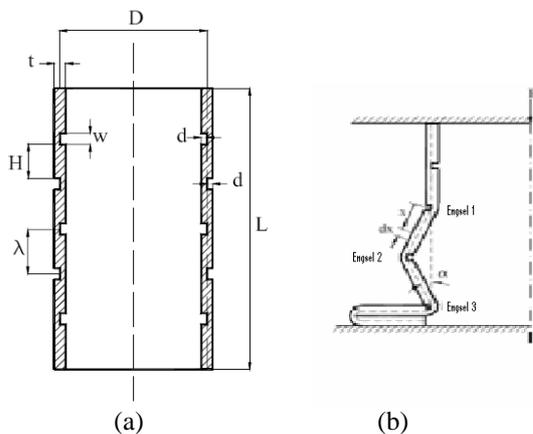
Salah satu aspek yang penting dalam masalah penyerapan energi ini adalah terdapatnya mekanisme pemicu peruntuhan pada tabung (*collapse trigger mechanism*). Pemicu ini untuk menjaga agar peruntuhan berbentuk stabil dan menurunkan beban puncak peruntuhan. Apabila pemicu ini tidak dipasang, ada kemungkinan struktur akan mengalami kegagalan akibat beban tekuk (*overall buckling*) dan bukan peruntuhan karena lipatan plastis [9]. Akibatnya, struktur tidak lagi efektif untuk menyerap energi tumbukan, karena kegagalan tekuk bersifat katastrofik.

Berbagai bentuk pemicu kolaps diperkenalkan [9], di antaranya lipatan plastis awal, lubang lingkaran dan oval, serta membuat galur (*grooved*) pada tabung tersebut. Hadi et al [10] telah melakukan kaji eksperimental pada tabung yang mendapat beban aksial dengan pemicu berbentuk lipatan plastis awal, lubang lingkaran dan lubang oval. Hasilnya dibandingkan dengan pendekatan analitis yang dikembangkan oleh berbagai peneliti. Sedang masalah penyerapan energi tabung bergalur (*grooved tube*) akibat beban aksial diteliti oleh Daneshi dan Hosseini-pour [11,12,13,14], baik melalui pendekatan analitis maupun eksperimental. Dengan adanya galur yang dipasang berselang-seling di bagian luar dan dalam tabung, lipatan plastis akan terjadi pada galur tersebut yang akan menyebabkan tabung terlipat secara teratur. Beban rata-rata peruntuhan (*mean crushing load*), P_m , dihitung dengan menggunakan pendekatan energi, dengan mengabaikan energi elastis dan *strain hardening*.

Pada penelitian ini, beban rata-rata peruntuhan akan diprediksi dengan menggunakan kaji numerik metode elemen hingga eksplisit ABAQUS dan eksperimental. Hasilnya akan dibandingkan dengan pendekatan analitis yang telah dihasilkan oleh Daneshi dan Hosseini-pour [12].

2. PENDEKATAN ANALITIS

Gambar 1 menunjukkan tabung bergalur dan lipatan plastis yang terjadi akibat beban tekan.

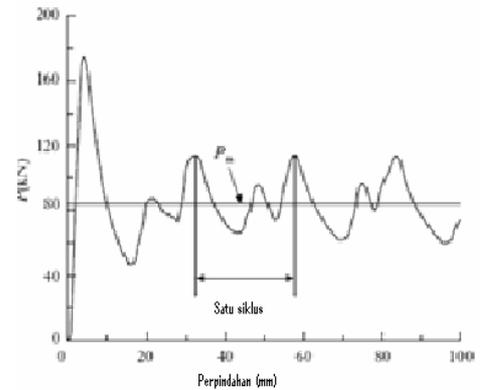


Gambar 1. (a) Spesimen awal tabung bergalur, dan (b) Lipatan platis yang terjadi akibat beban aksial[12]

Hosseini-pour dan Daneshi [12] dengan menghitung energi yang diperlukan untuk membuat lipatan plastis sehingga terbentuk lipatan sempurna, dan mengabaikan energi akibat regangan elastis dan *strain hardening*, dapat menghitung beban rata-rata, P_m , yang diperlukan untuk melakukan lipatan plastis. Beban tersebut diberikan dalam bentuk [12]:

$$P_m = \frac{\sqrt{3\pi^2\sigma_0Dt'^2 + 6\pi\sigma_0\lambda(\lambda t - wd)}}{6(\lambda - t)} \quad (1)$$

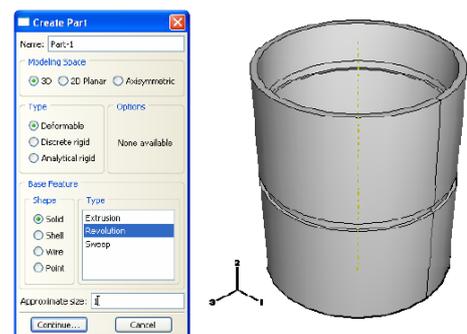
Dalam pengujian, P_m merupakan beban rata-rata dari kurva beban terhadap deformasi selama tabung mendapat beban aksial. Gambar 2 menunjukkan skema kurva antara beban terhadap deformasi selama terjadinya lipatan plastis pada tabung yang mendapat beban aksial.



Gambar 2. Kurva skematik beban terhadap deformasi pada tabung yang mendapat beban aksial [8].

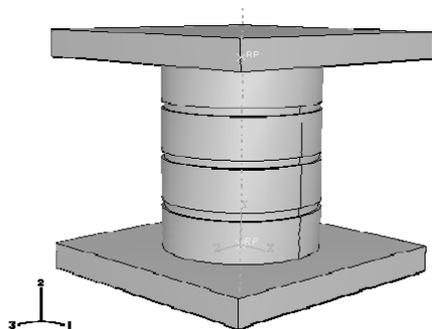
3. KAJI NUMERIK

Perangkat lunak metode elemen hingga ABAQUS digunakan untuk menganalisis kasus ini. Solusi yang digunakan adalah solusi eksplisit dinamik, mengingat solusi ini merupakan solusi yang paling cepat untuk menganalisis kasus dinamik seperti tumbukan. Elemen yang digunakan pada tabung adalah elemen bata solid (*solid brick element*) 3-dimensi hexahedral C3D8R, dengan delapan titik nodal pada setiap elemennya. Sifat elastis-plastis pada material tabung tersebut dimasukkan dalam modul sifat material. Gambar 3 menunjukkan model tabung bergalur; dengan 3 buah galur.



Gambar 3. Model elemen hingga pada tabung bergalur.

Tabung tersebut ditumpu di kedua sisinya dengan menggunakan pelat kaku (*rigid plate*) yang tidak terdeformasi. Gabungan pelat kaku dan tabung bergalur ini dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Gabungan dua pelat kaku yang mengapit tabung bergalur.

Pada saat analisis, pelat kaku bergerak ke bawah dengan kecepatan tertentu, sehingga menumbuk tabung bergalur dan menyebabkan lipatan plastis. Kecepatan tumbukan diatur sedemikian rupa, sehingga sifat tumbukan masih berada dalam batas kuasi-statik. Berdasarkan persamaan [15]:

$$\frac{\rho v^2}{\sigma_y} = \text{damage number} \quad (2)$$

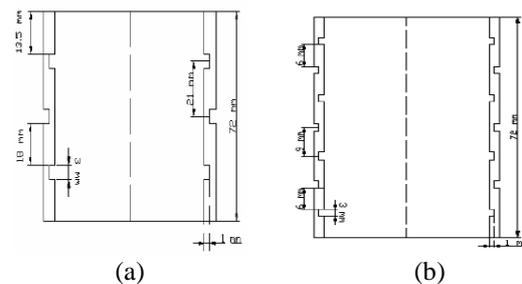
Bila damage number masih dalam kisaran $10^{-5} - 10^{-3}$, maka kecepatan tumbuk masih berada dalam katagori kuasi-statik [15].

Untuk mempercepat proses perhitungan, pada analisis ini, digunakan kecepatan tumbuk sebesar 2 m/s. Dengan massa jenis tabung sebesar $5 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/cm}^3$, dan tegangan luluh sebesar 135 – 139 MPa, akan didapat *damage number* pada rentang $1,44 \cdot 10^{-4}$ hingga $1,48 \cdot 10^{-4}$. Dengan demikian, kasus tumbukan ini masih dapat dikatagorikan ke dalam uji kuasi-statik.

Karena terjadinya tumbukan, dan energi kinetik penumbuk (pelat rigid) diserap oleh tabung bergalur dalam bentuk lipatan plastis, kecepatan penumbuk melambat. Perlambatan tersebut dapat diketahui dengan menggunakan ABAQUS. Bila masa penumbuk diketahui, maka dengan menggunakan hukum Newton, gaya tumbuk selama tumbukan dapat dihitung. ABAQUS menyediakan pula data mengenai deformasi pada tabung selama tumbukan. Dari kedua data tersebut dapat ditampilkan kurva gaya terhadap deformasi tabung selama terjadinya tumbukan tersebut, seperti pada Gambar 2. Dengan demikian, gaya peruntuhan rata-rata dapat dihitung, dan dapat pula dibandingkan dengan kaji eksperimen maupun pendekatan analitis.

4. KAJI EKSPERIMENTAL

Tabung yang digunakan adalah tabung aluminium dengan diameter 100 mm, panjang 72 mm dengan tebal 2 mm; dengan 3 dan 5 galur. Gambar 5 menunjukkan ukuran spesimen tersebut. Sedang Gambar 6 menunjukkan spesimen tabung bergalur yang akan diuji.

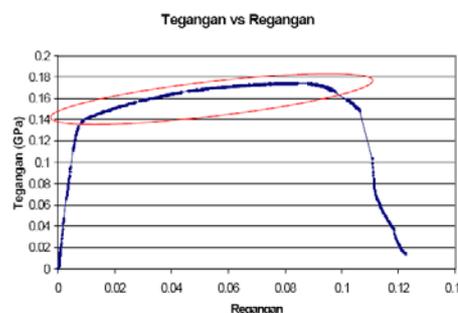


Gambar 5. Spesimen tabung bergalur dengan (a) tiga galur, dan (b) tujuh galur



Gambar 6. Spesimen tabung bergalur dengan 7 galur siap diuji.

Uji tarik juga dilakukan pada spesimen aluminium tersebut dan didapat kurva tegangan-regangan pada Gambar 7. Uji tarik dilakukan dengan menggunakan mesin uji universal Dartec dengan *ramp-rate* 0,02 mm/s.



Gambar 7. Kurva tegangan-regangan hasil uji tarik spesimen tabung bergalur.

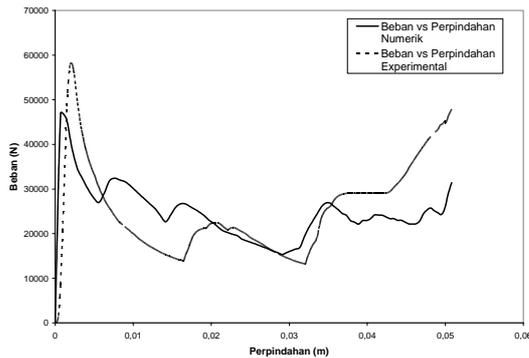
Data-data hasil uji tarik pada Gambar 7 tersebut di atas dipakai sebagai masukan untuk analisis metode elemen hingga dinamik eksplisit dengan menggunakan ABAQUS.

Uji tekan dilakukan pula dengan menggunakan mesin uji Dartec dengan *ramp-rate* 0,04 mm/s. Dari uji tekan tersebut akan didapat data-data gaya dan deformasi selama pengujian. Kurva gaya-deformasi ini yang akan dibandingkan dengan hasil kaji numerik.

5. ANALISIS

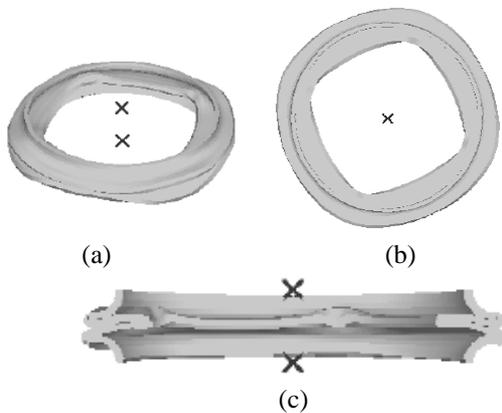
a. Tabung Diameter 100 mm dengan 3 galur

Perbandingan kurva gaya terhadap deformasi antara kaji numerik dan hasil percobaan pada tabung dengan 3 galur diberikan pada Gambar 8. Gambar 8 menunjukkan bahwa beban puncak (awal terbentuknya lipatan plastis pertama) hasil percobaan lebih besar dibanding kaji numerik. Meskipun demikian, secara keseluruhan, pola kurva hasil kaji numerik sesuai dengan hasil percobaan. Pada akhir percobaan, terlihat beban naik. Hal ini terjadi karena lipatan plastis sudah selesai terbentuk.



Gambar 8. Perbandingan kurva gaya-deformasi antara hasil numerik dan kaji eksperimental.

Karena keterbatasan bahan, hanya satu spesimen yang digunakan dalam percobaan. Bentuk lipatan plastis yang didapat dari kaji numerik secara tepat dapat memprediksi bentuk lipatan plastis hasil percobaan. Gambar 9 dan 10 menunjukkan perbandingan hasil akhir lipatan plastis kaji numerik dan hasil percobaan.



Gambar 9. Hasil akhir lipatan plastis kaji numerik pada tabung dengan 3 galur. (a) tampak samping, (b) tampak atas, dan (c) hasil potongan samping.

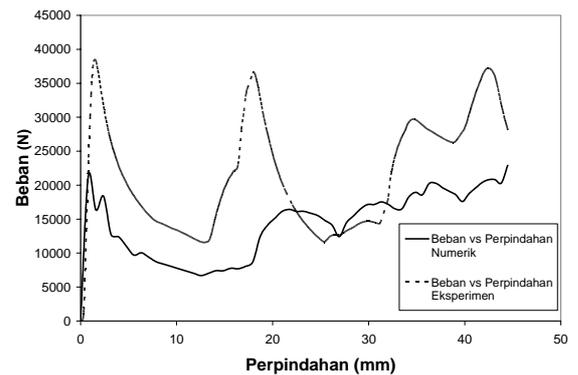


Gambar 10. Hasil akhir lipatan plastis hasil percobaan pada tabung dengan 3 galur.

Gambar 9 dan 10 menunjukkan bahwa terdapat kesesuaian yang tinggi antara bentuk akhir lipatan plastis kaji numerik dan hasil percobaan. Gambar-gambar tersebut juga menunjukkan bahwa lipatan plastis yang terjadi tidaklah teratur sempurna, sebagaimana diasumsikan pada Gambar 1, tetapi berbentuk segi-empat.

b. Tabung Diameter 100 mm dengan 7 galur

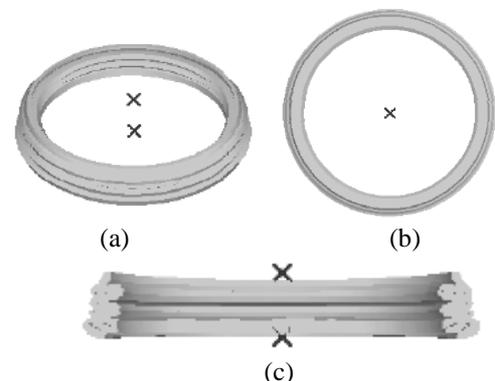
Perbandingan kurva gaya terhadap deformasi antara kaji numerik dan hasil percobaan pada tabung dengan 7 galur diberikan pada Gambar 11.



Gambar 11. Perbandingan kurva gaya-deformasi antara hasil kaji numerik dan eksperimental

Gambar 11 menunjukkan bahwa secara umum beban yang didapat dari hasil percobaan lebih besar dibanding kaji numerik, termasuk beban puncak pertama terjadinya lipatan plastis. Meskipun demikian, pola kurva yang terjadi menunjukkan pola yang sama, yaitu pola beban naik turun, yang menunjukkan awal dan akhir terbentuknya lipatan plastis.

Bentuk akhir lipatan plastis yang terjadi diberikan dalam Gambar 12 dan 13.



Gambar 12. Hasil akhir lipatan plastis kaji numerik pada tabung dengan 7 galur. (a) tampak samping, (b) tampak atas, dan (c) hasil potongan samping.



Gambar 13. Hasil akhir lipatan plastis hasil percobaan pada tabung dengan 7 galur.

Gambar 12 dan 13 menunjukkan bahwa terdapat kesesuaian yang baik pada bentuk akhir lipatan plastis yang terjadi antara hasil kaji numerik dan percobaan. Kaji numerik dengan menggunakan metode dinamik eksplisit dengan ABAQUS dapat memprediksi dengan tepat bentuk akhir lipatan plastis yang terjadi, meskipun beban yang didapat dari kaji numerik ini masih lebih rendah dibanding hasil percobaan. Hal ini masih perlu dikaji lebih lanjut, terutama kesesuaian masalah kondisi batas tumpuan dan model sifat material bahan antara kaji numerik dan eksperimental.

c. Beban peruntuhan rata-rata, P_m .

Beban peruntuhan rata-rata, P_m , merupakan indikator penting dalam penyerapan energi struktur akibat tumbukan. Nilai P_m yang tinggi menunjukkan bahwa struktur tersebut mampu menyerap energi tumbukan yang besar. Meskipun demikian, pada aplikasi di kendaraan, nilai P_m harus dijaga cukup rendah, agar tidak menyebabkan luka-luka pada penumpang di dalamnya.

Tabel 1 menunjukkan perbandingan P_m antara hasil pendekatan analitis, numerik dan percobaan.

Tabel 1. Perbandingan P_m pada tabung bergalur yang mendapat beban aksial

| Jumlah Galur | Pendekatan analitik (N) (<i>Pers. 1</i>) | Hasil numerik (N) | Hasil percobaan (N) |
|--------------|--|-------------------|---------------------|
| 3 | 20.294 | 24.181 | 25.217 |
| 7 | 14.161 | 14.283 | 21.533 |

Tabel 1 menunjukkan bahwa dengan bertambahnya galur dan panjang tabung yang tetap, beban P_m yang didapat semakin kecil. Ini menunjukkan bahwa dengan bertambahnya galur menyebabkan energi tumbukan yang dapat diserap akan semakin kecil.

Pada tabung dengan 3 galur, hasil numerik dan percobaan berbeda cukup jauh (sekitar 20%) dibanding dengan hasil analitis. Ini karena pendekatan analitis mengasumsikan bahwa lipatan plastis berbentuk sempurna, dengan penampang tabung tetap berbentuk lingkaran selama proses pelipatan plastis berlangsung, seperti pada Gambar 1. Yang terjadi pada tabung dengan 3 galur adalah bahwa bentuk penampang berubah menjadi segi-empat. Baik hasil numerik maupun hasil

percobaan menunjukkan hasil yang sama, yaitu penampang tabung yang berubah menjadi segi-empat.

Hasil kajian pada tabung dengan 3 galur juga menunjukkan kesesuaian yang baik antara hasil percobaan dan hasil numerik; baik pada harga P_m maupun bentuk akhir lipatan plastis. Perbedaan P_m yang terjadi kurang dari 5%.

Hal yang berbeda terjadi pada tabung dengan 7 galur. Pada tabung tersebut, terdapat kesesuaian yang baik antara hasil numerik dan pendekatan analitis. Hal ini terjadi karena bentuk lipatan plastis berbentuk sempurna, berupa lipatan-lipatan teratur, dengan bentuk penampang tabung tetap berbentuk lingkaran, sebagaimana yang diasumsikan pada pendekatan analitis. Hal ini dengan tepat juga dihasilkan oleh kaji numerik. Karena itu, terdapat kesesuaian yang baik antara kaji analitis dan numerik, baik pada P_m maupun bentuk akhir lipatan plastis. Perbedaan P_m yang terjadi antara hasil analitis dan numerik kurang dari 1%.

Hasil percobaan juga menunjukkan bahwa bentuk akhir lipatan plastis juga teratur, dengan bentuk penampang tabung tetap berbentuk lingkaran. Meskipun demikian, harga P_m yang didapat lebih besar dibanding dengan hasil numerik maupun pendekatan analitis. Hal ini perlu pengkajian lebih lanjut menyangkut kondisi batas dan juga model plastisitas material yang digunakan.

Secara umum juga dapat disimpulkan bahwa beban P_m yang didapat dari hasil percobaan selalu lebih besar dibanding kaji numerik maupun pendekatan analitis.

6. KESIMPULAN

Dalam makalah ini telah dikaji penyerapan energi tabung bergalur yang mendapat beban aksial; baik dengan menggunakan pendekatan analitik, numerik dengan menggunakan dinamik eksplisit dengan ABAQUS maupun dengan percobaan. Hasilnya menunjukkan bahwa secara keseluruhan, kaji numerik dapat memprediksi dengan baik bentuk akhir lipatan plastis yang terjadi dan hasilnya sesuai dengan hasil percobaan.

Dari penelitian ini juga didapat bahwa dengan semakin banyaknya jumlah galur dengan panjang tabung yang sama, bentuk lipatan plastis akan semakin teratur dan berakibat pada turunnya nilai P_m . Pada tabung dengan 3 galur, bentuk lipatan plastis yang terjadi tidak teratur, dan penampang tabung berubah menjadi bentuk segi-empat. Sedang pada tabung dengan 7 galur, bentuk akhir lipatan plastis yang terjadi teratur, dan bentuk penampang tabung tetap berbentuk lingkaran.

Secara umum, nilai P_m hasil percobaan selalu lebih besar dibanding hasil pendekatan analitis maupun numerik. Perbedaan hasil percobaan dengan pendekatan analitik dan numerik bervariasi dari 5% hingga 20%. Kaji lebih lanjut diperlukan untuk menurunkan perbedaan tersebut.

Nomenklatur:

| | |
|------------|--|
| P_m | : Beban peruntuhan rata-rata |
| σ_o | : Tegangan alir (<i>flow stress</i>) |
| D | : Diameter tabung |
| λ | : Jarak antar galur |
| t | : Tebal tabung |
| t' | : Tebal tabung pada galur = $t - d$ |
| d | : Tebal dinding tabung di tempat galur |
| w | : Lebar galur |
| ρ | : Massa jenis tabung |
| v | : Kecepatan tumbuk |
| σ_y | : Tegangan luluh |

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*, 13, 10-15, 1960.
2. W. Abramowicz dan N. Jones, Dynamic axial crushing of circular tubes, *International Journal of Impact Engineering*, 2, 263-281, 1984.
3. W. Abramowicz dan N. Jones, Dynamic progressive buckling of circular and square tubes, *International Journal of Impact Engineering*, 4, 243-269, 1986.
4. R.H. Grzebieta, An alternative method for determining behavior of round stocky tubes subjected to axial crush loads, *Thin Walled Structures*, 9, 66-89, 1990.
5. 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*, 29, 3269-3288, 1992.
6. 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*, 32, 3589-3602, 1995.
7. 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*, 33, 3517-3538, 1996.
8. X. Huang dan G. Lu, Axisymmetric progressive crushing of circular tubes, *International Journal of Crashworthiness*, 8, 1, 87-95, 2003.
9. N. Jones, *Structural Impact*, Cambridge University Press, London, 1989.
10. Bambang K. Hadi, Ichsan S. Putra, Yanyan Tedy S, Kaji eksperimental penyerapan energi tabung aluminium yang mengalami beban tekan arah aksial, *Jurnal Teknik Mesin*, 21, 2, 59-64, 2006.
11. G.H. Daneshi dan S.J. Hosseini-pour, Elastic-plastic theory for initial buckling load of thin-walled grooved tubes under axial compression, *Journal of Material Processing Technology*, 125-126, 826-832, 2002.
12. S.J. Hosseini-pour dan G.H. Daneshi, Energy absorption and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression, *Thin-Walled Structures*, 41, 31-46, 2003.
13. S.J. Hosseini-pour, Mathematical model for thin-walled grooved tubes under axial compression, *Materials and Design*, 24, 463-469, 2003.
14. G.H. Daneshi dan S.J. Hosseini-pour, Grooves effect on crashworthiness characteristics of thin-walled tubes under axial compression, *Materials and Design*, 23, 611-617, 2003.
15. W. Johnson, *Impact Strength of Materials*, Edward Arnold, London, 1972.