

Studi Parametrik Kasus Tumbukan Kecepatan Rendah pada Tabung Berpenampang Bujursangkar Berlubang Menggunakan Metode Elemen Hingga

S.A. Sitompul¹, R. Fitriansyah, T. Dirgantara², L. Gunawan³ dan I.S. Putra⁴

Kelompok Keahlian Struktur Ringan
Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara
Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesha 10, Bandung 40132 Indonesia

¹sahrilafandi@students.itb.ac.id, ²tdirgantara@ftmd.itb.ac.id, ³gun@ae.itb.ac.id, ⁴isp@aero.pauir.itb.ac.id

Abstrak

Kendaraan bermotor membutuhkan suatu sistem penyerap energi tumbukan guna melindungi kabin penumpang selama mengalami kecelakaan. Sistem ini bekerja dengan cara menyerap energi tabrakan melalui proses deformasi plastis yang disebut *progressive buckling* sehingga diharapkan dapat memperkecil cedera pada penumpang karena kerusakan struktur dapat dilokalisasi pada bagian tertentu saja. Selain itu, penyerapan energi ini dapat membatasi perlambatan yang dirasakan penumpang dalam batas aman. *Crushing box* merupakan salah satu komponen yang digunakan sebagai penyerap energi dan secara umum strukturnya berupa tabung berdinding tipis. Pada desain *crushing box*, tabung tersebut dapat diberi diskontinuitas berupa lubang sirkular sehingga diharapkan proses deformasi selalu dimulai di sekitar lubang tersebut. Pada paper ini, analisis numerik dilakukan pada tabung berdinding tipis dengan penampang berbentuk bujur sangkar yang diberi lubang pada salah satu sisi untuk mengetahui pengaruh lubang sirkular pada tabung bujur sangkar terhadap *peak crush load* yang terjadi, sehingga perlambatan saat terjadi tumbukan frontal lebih seragam. Analisis dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga. Hasil analisis menunjukkan bahwa adanya diskontinuitas berupa lubang sirkular pada salah satu sisi spesimen tabung akan menurunkan besarnya *crushing force* maksimum, P_{max} , yang berbanding lurus dengan kenaikan harga rasio diameter lubang terhadap lebar sisi tabung (D/b).

Keywords: Sistem *bumper*, tabung bujursangkar, gaya puncak, tumbukan berkecepatan rendah, lubang sikular

Pendahuluan

Jumlah pengguna kendaraan, khususnya roda empat, terus mengalami peningkatan setiap tahun dan diperkirakan juga kecelakaan lalu lintas di Wilayah Asia Timur dan Pasifik mengalami peningkatan sebesar 79% dalam rentang tahun 2000-2020 (World Health Organization (WHO) 2004). Oleh sebab itu, isu sistem proteksi pada kendaraan menjadi penting ketika terjadi tabrakan yang memungkinkan penyebab korban fatal. Sistem *bumper* biasanya dimanfaatkan sebagai sistem proteksi utama penyerap energi tabrakan yang terdiri dari struktur *frontal bar* dan *crushing box*. *Frontal bar* berfungsi meneruskan interaksi langsung dari sumber tumbukan ke *crushing box*. Struktur *crushing box* selama proses tabrakan akan mengalami pelipatan dan berdeformasi plastis secara berulang yang disebut dengan *progressive buckling* sebagai mekanisme penyerapan energi. Penelitian tentang mekanisme penyerapan energi

melalui *progressive buckling* dimulai oleh Alexander (1960), Wierzbicki & Abramowicz (1983) dan Abramowicz & Jones (1984). Penelitian ini juga dikembangkan oleh Kelompok Keahlian Struktur Ringan, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara ITB, melalui simulasi numerik dan eksperimen (Hendradjaja 2010, Arindah 2010, Sitompul 2011, Jusuf 2011).

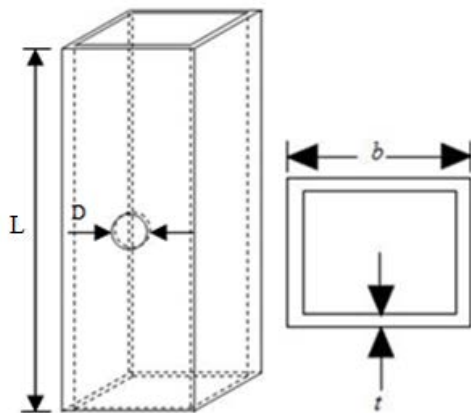
Perancangan *crushing box* umumnya memiliki geometri tabung yang sempurna. Beberapa literatur penelitian tentang efek modifikasi seperti pemberian *trigger* atau diskontinuitas pada *crushing box* telah dilakukan oleh (Witteman 1999, Chen & Altenhof 2006). Pada paper ini, studi parametrik tumbukan kecepatan rendah pada tabung berlubang akan memberikan parameter-parameter penting dalam perancangan *crushing box* berlubang yang berguna bagi industri guna merancang sistem proteksi yang lebih baik.

Analisis Elemen Hingga

Studi kasus parametrik dilakukan dengan simulasi elemen hingga dengan perangkat lunak LS-DYNA pada tabung berdinding tipis berpenampang bujur sangkar dengan satu lubang berbentuk lingkaran pada setengah tinggi tabung pada salah satu sisinya. Ukuran lubang dinyatakan sebagai perbandingan non-dimensional D/b , dengan D adalah diameter lubang dan b adalah panjang sisi penampang tabung seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

Simulasi dilakukan pada tabung dengan lima harga panjang sisi penampang, yaitu 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm dan 80 mm. Untuk setiap tabung dengan panjang sisi tertentu, dilakukan simulasi untuk 9 harga D/b , yaitu 0 (sebagai acuan) sampai 0,8 dengan peningkatan sebesar 0,1. Dengan demikian jumlah tabung yang dianalisis ada sebanyak 45 buah, seperti ditunjukkan dapat dilihat pada Tabel 1.

Simulasi numerik dilakukan dengan cara menumbukkan suatu benda dengan massa dan kecepatan tertentu secara aksial terhadap spesimen yang ditumpu pada salah satu ujungnya. Penumbuk dimodelkan menggunakan elemen *rigid* yang tidak mengalami deformasi selama simulasi dengan massa 65 kg dan kecepatan awal 7,3 m/s. Spesimen tabung dimodelkan dengan elemen *Shell Belytschko-Tsay*.



Gambar 1 Geometri spesimen uji

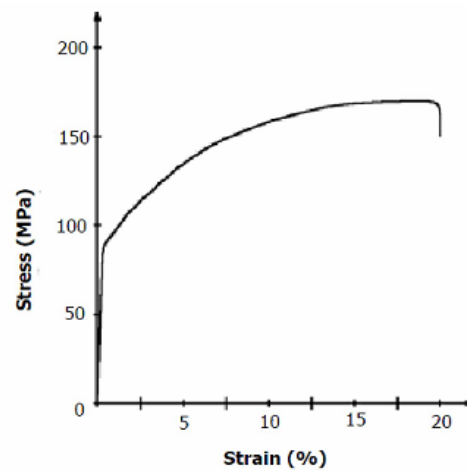
Tabel 1 Konfigurasi geometri tabung yang dianalisis

Kode spesimen tabung	b (mm)	t (mm)	L (mm)	Banyak lubang	D/b								
A0	40	1,4	152	0	0								
A1	40	1,4	152	1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	
B0	50	1,4	152	0	0								
B1	50	1,4	152	1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	
C0	60	1,4	152	0	0								
C1	60	1,4	152	1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	
D0	70	1,4	152	0	0								
D1	70	1,4	152	1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	
E0	80	1,4	152	0	0								
E1	80	1,4	152	1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	

Jenis material yang digunakan pada simulasi adalah material Aluminium AA6060-T4 untuk tabung bujur sangkar dan material *rigid* untuk penumbuk. Kurva tegangan-regangan Aluminium AA6060-T4 (Fitriansyah 2012) ditunjukkan pada Gambar 2 dan sifat materialnya ditampilkan pada Tabel 2. Sifat material penumbuk ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2 Properti material Aluminium AA6060-T4

E (Young's Modulus)	68,2 GPa
σ_{ys} (Yield Strength)	0,08 GPa
ν (Poisson's Ratio)	0,3
ρ (Massa Jenis)	$2,7 \times 10^{-4}$ kg/mm
n (power law exponent)	0,23



Gambar 2 Kurva tegangan-regangan Aluminium AA6060-T4

Tabel 3 Properti material penumbuk

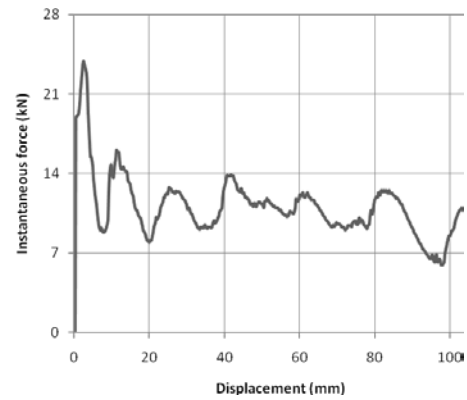
E (Young's Modulus)	200 GPa
ν (Poisson's Ratio)	0,3
ρ (Massa Jenis)	$1,29 \times 10^{-4}$ kg/mm ³

Kondisi batas fix diberikan pada elemen paling bawah model tabung yang mewakili fungsi penyangga (*support*). Untuk memodelkan tumbukan yang terjadi, kondisi kontak didefinisikan antara penumbuk dengan spesimen dan antara permukaan tabung ketika terjadi proses pelipatan. Untuk interaksi antara penumbuk dengan spesimen tabung digunakan jenis kontak *automatic node to surface*, dan untuk interaksi dinding-dinding tabung spesimen saat *progressive buckling* digunakan kontak *automatic single surface*. Keluaran analisis metode elemen hingga berupa informasi harga gaya tumbuk untuk setiap deformasi aksial yang terjadi pada tabung (grafik *instantaneous force-displacement*). Dengan membandingkan kurva-kurva tersebut untuk berbagai geometri tabung, pengaruh lubang pada dinding tabung dapat dianalisis.

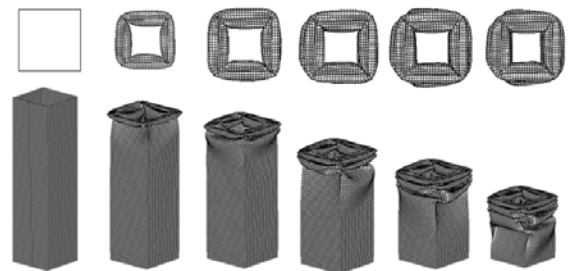
Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi elemen hingga guna melihat efek lubang pada berbagai konfigurasi geometri tabung dijelaskan pada bagian ini.

Gambar 3 menunjukkan harga gaya tumbuk terhadap deformasi aksial untuk model tabung A0 ($b=40$ mm, tanpa lubang), dan Gambar 4 menunjukkan proses pelipatan yang terjadi pada tabung tersebut. Grafik *instantaneous force vs. displacement* hasil simulasi ini menunjukkan bahwa harga gaya tumbuk berfluktuasi selama proses *progressive buckling*. Setiap puncak pada kurva ini berhubungan dengan tiap proses pelipatan yang terjadi pada spesimen. Harga gaya tumbuk memiliki nilai yang paling tinggi pada lipatan pertama dibandingkan dengan puncak setelahnya, dan disebut sebagai P_{max} . Harga gaya yang diperlukan untuk membuat lipatan selanjutnya tidak tinggi lagi karena sudah terjadi deformasi pada tabung. Harga P_{max} yang tinggi pada awal deformasi ini kurang menguntungkan karena akan memberi perlambatan yang tinggi pada saat awal tabrakan. Untuk keselamatan penumpang, tabung yang memberi grafik *instantaneous force vs. displacement* lebih diinginkan.

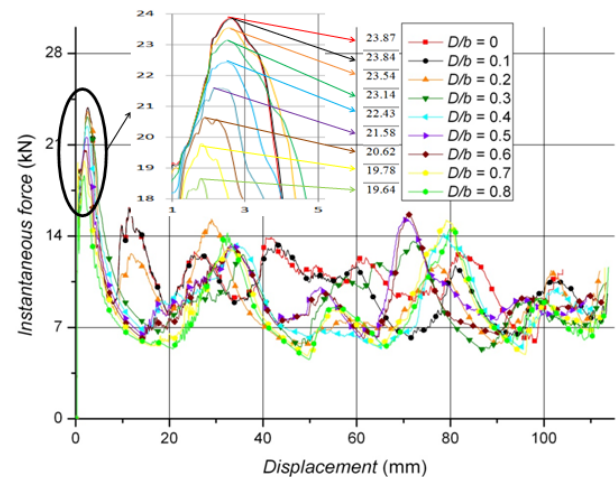


Gambar 3 Grafik *instantaneous force-displacement* tabung A dengan $b = 40$ mm tanpa lubang



Gambar 4 Deformasi tabung A dengan $b = 40$ mm tanpa lubang

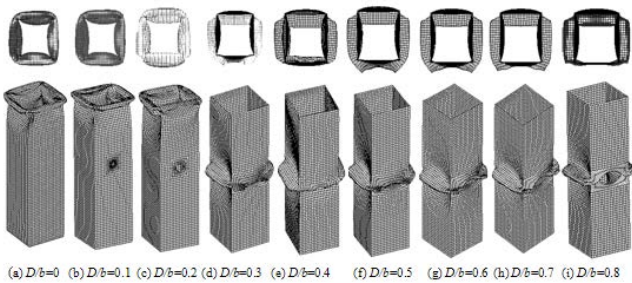
Gambar 5 menunjukkan grafik *instantaneous force-displacement* untuk tabung dengan panjang sisi 40 mm yang memiliki lubang dengan D/b antara 0 sampai 0.8. Gambar 6 menunjukkan pola deformasi akhir yang terjadi untuk tabung-tabung tersebut saat waktu simulasi $t=3$ ms. Waktu yang diperlukan oleh tabung untuk menahan penumbuk adalah sekitar 25 ms.



Gambar 5 Grafik *instantaneous force-displacement* tabung A ($b = 40$ mm) untuk berbagai harga D/b

Tabel 1 Perbandingan harga P_{max} untuk seluruh model

D/b	P_{max} (kN) Model A1 b=40 mm	P_{max} (kN) Model B1 b=50 mm	P_{max} (kN) Model C1 b=60 mm	P_{max} (kN) Model D1 b=70 mm	P_{max} (kN) Model E1 b=80 mm
0	23,87	30,24	35,18	42,27	47,13
0,1	23,84	30,15	34,97	42,26	46,9
0,2	23,54	29,8	34,53	41,3	46,2
0,3	23,14	29,01	33,63	40,2	43,31
0,4	22,43	27,91	32,62	38,92	43,3
0,5	21,58	26,64	31,45	37,17	42,03
0,6	20,62	25,58	30,25	35,64	38,56
0,7	19,78	24,75	29,16	34,57	38,2
0,8	18,66	23,22	28,08	33,42	37,54

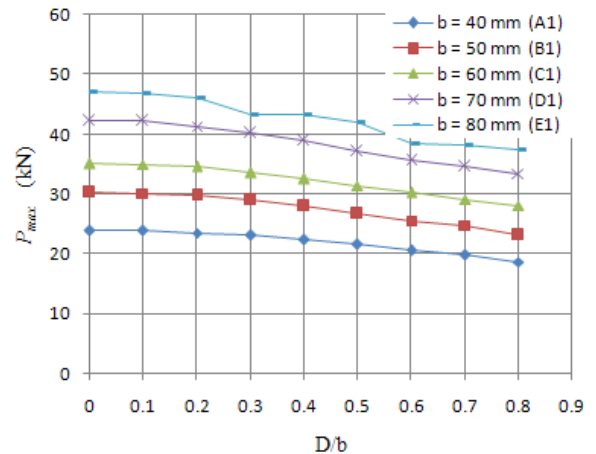


Gambar 6 Deformasi tabung A (b = 40 mm) untuk setiap harga D/b saat t=3 ms

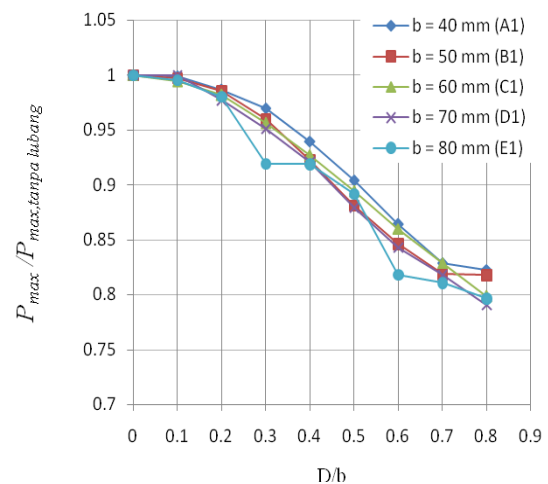
Gambar 5 menunjukkan bahwa lubang pada salah satu dinding tabung mengakibatkan penurunan P_{max} , terutama untuk $D/b \geq 0,3$. Gambar 6 menunjukkan bahwa untuk tabung dengan $D/b \geq 0,3$ deformasi awal terjadi di sekitar lubang yang membuat P_{max} turun. Deformasi selanjutnya terjadi pada daerah tanpa lubang yang tidak terpengaruh lagi oleh keberadaan lubang. Untuk $D/b < 0,3$, deformasi tetap terjadi pada ujung tabung. Dengan demikian lubang berbentuk lingkaran dengan $D/b \geq 0,3$ pada salah satu dinding tabung dengan penampang berbentuk bujur sangkar dapat menurunkan harga P_{max} .

Simulasi untuk tabung dengan panjang sisi yang lain dilakukan dengan cara yang sama. Hasil-hasil yang didapat dari simulasi untuk tabung dengan panjang sisi yang lain menunjukkan kecenderungan yang sama seperti pada hasil tabung dengan panjang sisi 40 mm. Untuk melihat pengaruh ukuran lubang, harga P_{max} untuk tiap tabung dengan panjang sisi yang sama ditampilkan pada Tabel 4 dan ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 7. Terlihat bahwa untuk setiap tabung dengan panjang sisi yang sama, terjadi penurunan P_{max} dengan kecenderungan yang sama. Untuk memastikan kecenderungan tersebut, harga P_{max} pada tiap tabung dengan lubang dinormalisasi dengan harga P_{max} tabung tanpa lubang, sebagaimana

ditampilkan pada Gambar 8. Dapat dilihat bahwa persentase penurunan P_{max} praktis sama jika tabung diberi lubang dengan rasio diameter D/b yang sama.



Gambar 7 Grafik P_{max} terhadap rasio D/b



Gambar 8 Perubahan $P_{max} / P_{max,tanpa lubang}$ terhadap D/b

Kesimpulan

Berdasarkan simulasi elemen hingga untuk kasus tumbukan pada tabung berpenampang bujur sangkar, dapat disimpulkan bahwa:

1. Diskontinuitas berupa lubang berbentuk lingkaran pada bagian tengah salah satu dinding tabung bujur sangkar akan menurunkan harga *peak crush load* (P_{max}) tabung tersebut.
2. Penurunan P_{max} terjadi jika ukuran lubang memiliki rasio $D/b \geq 0,3$.
3. Untuk $D/b \geq 0,3$, efek rasio D/b akan memberi persentase penurunan P_{max} yang sama.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini terselenggara berkat dukungan dana dari Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, Republik Indonesia melalui program Hibah Kompetensi 2009–2011, Hibah Bersaing 2009–2011, Collaborative Research ITB - KAIST 2009–2011 dan dana Hibah Riset KK ITB 2011 Dana Program Riset dan Inovasi ITB 2012.

Referensi

- World Health Organization, World Report on Road Traffic Injury Prevention: Summary (2004)
- Alexander, J. M., An Approximate Analysis of the Collapse of Thin Cylindrical Shells under Axial Loading, *Journal of Mechanics and Applied Mathematics* (1960)
- Wierzbicki, T. & Abramowicz, W., On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 50, pp. 727-734 (1983)
- Abramowicz, W. & Jones N., Dynamic Axial Crushing of Square Tubes, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.2, No.2, pp.179-208 (1984)
- Witteman, Willibrordus J., Improved Vehicle Crashworthiness Design by Control of the Energy Absorption for Different Collision Situation, TU Eindhoven University (1999)
- Cheng, Q. & Altenhof W., Experimental Investigations on the Crush Behaviour of AA6061-T6 Aluminum Square Tubes with Different Types of Through-Hole Discontinuities, *Journal of Thin-Walled Structures*, Volume 44, Pages 441–454 (2006)
- Hendradjaja, S.S., Gunawan, L., Drgantara, T., Putra, I.S., Numerical Parametric Study for Prismatic Columns Subjected to Low Velocity Impact Loading, Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technolgy, Feruary 9-10, Bali, Indonesia (2010)
- Arindah, N., Dirgantara, T., Gunawan, L., Putra, I.S., Analisa Impak Kecepatan Rendah pada Tabung PVC Menggunakan Metode Elemen Hingga, Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-9, hal. MIII-257 - MII-264, , ISBN: 978-602-97742-0-7, 13-15 Oktober 2010, Palembang, Indonesia (2010)
- Sitompul, S.A., Dirgantara, T., Gunawan, L., Putra, I.S., Kaji Numerik dan Eksperimen Tumbukan Kuasi-Statik pada Tabung Silinder Polyvinyl Chloride, Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin X, 2-3 November 2011, ISBN 978-602-19028-0-6, p.803-809., Malang, Indonesia (2011)
- Jusuf, A., Allam, F.S, Dirgantara, T., Gunawan, L., Putra, I.S., Low Velocity Impact Analyses of Prismatic Columns using Finite Element Method, *Key Engineering Materials Vols. 462-463* (2011) pp.1308-1313 (2011)
- Fitriansyah, R., Dirgantara, T., Gunawan, L., Putra, I.S., Studi Parametrik Kasus Tumbukan Kecepatan Rendah pada Tabung Berpenampang Bujursangkar Berlubang Menggunakan Metode Elemen Hingga, Program Studi Aeronotika & Astronotika, Fakultas Teknik Mesin & Dirgantara, ITB (2012)