

ANALISA IMPAK KECEPATAN RENDAH PADA TABUNG PVC MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

N. Arindah, T. Dirgantara, L. Gunawan dan I.S. Putra

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No.10 Bandung 40132
Jawa Barat, Indonesia

Phone: +62-22-2504243, FAX: +62-22-2534099, E-mail: gun@ae.itb.ac.id

Abstrak

Karakter penyerapan energi impact oleh batang prismatik yang terbuat dari PVC dipelajari menggunakan software numerik LS-DYNA. Fenomena yang diteliti adalah *crushing force*, yaitu gaya yang diperlukan untuk menghasilkan deformasi plastis pada tabung, dan bentuk deformasi yang terjadi. Dalam simulasi, dilakukan variasi parameter berupa model material, koefisien gaya gesek, ketebalan dan radius tabung. Hasil simulasi diverifikasi menggunakan hasil studi yang telah dilakukan peneliti lain.

Hasil studi menunjukkan bahwa model material yang cocok digunakan dalam simulasi elemen hingga material PVC adalah *polymer plasticity*, koefisien gaya gesek tidak berpengaruh signifikan terhadap kenaikan *mean crushing force*, dan peningkatan ketebalan dan radius tabung akan meningkatkan harga *mean crushing force*. Untuk prosentase perubahan yang sama besar, peningkatan ketebalan tabung membuat harga *mean crushing force* jauh lebih tinggi dibandingkan dengan harga *mean crushing force* akibat peningkatan radius tabung.

Kata kunci: Sistem bumper, beban impact, tabung lingkaran, *mean crushing force*, tumbukan berkecepatan rendah.

1. Pendahuluan

Tabrakan frontal merupakan jenis kecelakaan dengan persentase paling tinggi (1). Jenis tabrakan ini sering terlihat pada kecelakaan di daerah dengan arus lalu lintas padat, dimana kendaraan menabrak kendaraan lain atau benda lain seperti jembatan. Untuk melindungi penumpang terhadap tabrakan, di bagian depan kendaraan dipasang sistem *bumper* yang akan menyerap energi tabrakan dengan cara berdeformasi dan memberi perlambatan pada tingkat aman terhadap penumpang. Pada umumnya sistem *bumper* kendaraan terdiri atas dua bagian, yaitu *frontal bar* dan *crushing box*. *Frontal bar* merupakan bagian yang langsung berinteraksi dengan sumber tumbukan dan meneruskan beban tumbukan ke *crushing box*. Keamanan penumpang saat terjadi tabrakan menjadi salah satu klausul penting dalam ujian penilaian mobil baru yang dipelopori oleh NCAP (*New Car Assessment Program*). NCAP juga mengatur kriteria desain *bumper* mobil terutama bagian *crushing box*.

Perilaku *crushing box*, yang biasanya terbuat dari logam, ketika menerima beban tumbukan arah *longitudinal* telah banyak diteliti (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9). Teori dasar mekanika struktur ber dinding tipis yang dipublikasikan oleh Abramowicz (3) (5) (6) membahas

hubungan antara lebar kolom, ketebalan dinding dan bentuk geometri pada penyerapan energi untuk modus pelipatan (*folding*) tertentu. Abramowicz dan Wierzbicki juga melakukan penelitian mengenai tumbukan aksial pada tabung logam yang diberi *foam* secara eksperimental dan teoritik.

Dalam Kelompok Keahlian Struktur Ringan, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara ITB, saat ini tengah dilakukan penelitian guna mendapatkan prosedur desain *crushing box* secara praktis dan mudah (10) (11) (12) (13) (14). Berbagai konfigurasi batang prismatik telah dikaji secara numerik dan divalidasi secara eksperimen. Salah satu konfigurasi *crash box* yang menjadi perhatian adalah tabung berisi metal foam karena memiliki kemampuan absorpsi energi yang lebih baik dibandingkan dengan tabung logam saja, sebagaimana ditunjukkan oleh beberapa peneliti (13) (15). Untuk mengefisienkan penelitian mengingat harga metal foam yang saat ini cukup tinggi dan juga material tersebut tidak mudah didapat, direncanakan untuk melakukan studi awal menggunakan tabung PVC yang diisi dengan polyurethane foam. Setelah mekanisme penyerapan energi pada tabung berisi foam dapat dipahami dengan baik, penelitian akan dilakukan pada

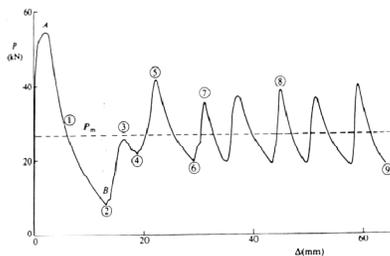


tabung aluminium berisi aluminium foam. Penelitian tentang impact pada tabung PVC telah dilakukan oleh beberapa peneliti lain (15) (16) (17) (18) (19) (20). Paper ini menyajikan hasil simulasi impact pada tabung PVC tanpa foam. Tujuan simulasi ini adalah untuk memahami proses modeling beban impact pada tabung PVC dan mengetahui pengaruh berbagai parameter terhadap mean crushing force, yaitu gaya rata-rata yang diperlukan untuk mendapatkan deformasi progresif pada tabung PVC. Parameter yang dikaji adalah pemodelan material, koefisien gesek antara penumbuk dengan tabung dan antara dinding tabung itu sendiri, tebal tabung dan radius tabung.

2. Teori

Peristiwa tumbukan merupakan fenomena dinamik karena semua parameter (gaya dan perpindahan) yang terjadi merupakan fungsi waktu dan biasanya terjadi dalam waktu yang relatif singkat. Tumbukan tersebut mengakibatkan terjadinya gelombang deformasi yang merambat sepanjang benda yang disebut dengan *stress wave*. Pada tabung yang mengalami tumbukan dalam arah aksial, gelombang deformasi ini dikenal sebagai *progressive buckling*. Dalam fenomena ini, energi tumbukan diserap oleh deformasi plastis yang berurutan dan berulang.

Sebuah tabung aluminium ketika mendapat beban *longitudinal* akan memiliki karakteristik kurva gaya-perpindahan dengan pola berulang, seperti ditunjukkan pada gambar 1. Tiap pasang puncak pada kurva gaya-perpindahan berhubungan dengan terjadinya sebuah lipatan pada tabung. Biasanya lipatan-lipatan ini terjadi secara berurutan dari salah satu ujung tabung. Gaya awal yang menyebabkan terjadinya pelipatan pada tabung sangat erat kaitannya dengan gaya maksimum pada awal siklus *buckling*. Gaya ini sangat penting untuk desain *crashworthiness* yang memberikan indikasi besarnya gaya untuk memicu terjadinya *collapse* dan memulai proses penyerapan energi.

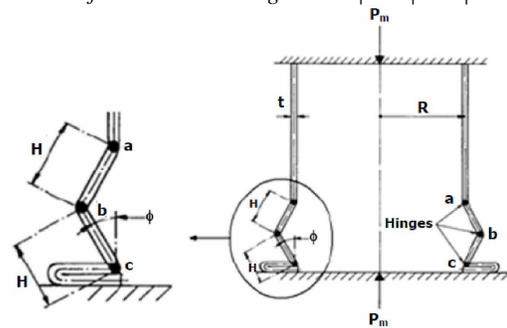


Gambar 1 Kurva gaya-perpindahan tabung aluminium yang diberi beban longitudinal (2)

Dalam pemodelan, mekanisme terbentuknya lipatan ini dibuat dengan asumsi material yang rigid dan plastis serta dengan menggunakan kondisi kontinuitas

kinematik pada batas antara daerah rigid dan daerah yang berdeformasi. Teori tumbukan untuk tabung berpenampang lingkaran pertama kali diteliti oleh Alexander dan kemudian dikembangkan oleh Abramowicz dan Jones (3).

Besar gaya yang diperlukan untuk menghasilkan deformasi dapat didekati secara analitik. Gambar 2 menunjukkan tabung lingkaran dengan jari-jari R dan ketebalan mengalami tumbukan arah aksial. Energi plastis akan didisipasikan melalui sebuah lipatan (*folding*) yang sempurna yaitu saat batang (abc) menjadi batang yang lurus. Dapat disimpulkan bahwa energi plastis total akan diserap oleh titik a dan c , serta energi total yang terdisipasi oleh titik b dan penyerapan energi pada *circumferential stretching* ketika $\phi \rightarrow \phi + d\phi$.



Gambar 2 Modus deformasi tabung yang diidealisasi berbentuk axisimetrik atau concertina (3)

Berdasarkan (3), besar elemen setengah *folding* H dapat diprediksi sebagai berikut :

$$\dots \dots \dots (1)$$

Mean crushing force didefinisikan sebagai rata-rata dari gaya instantaneous untuk setiap perpindahan δ sbb:

$$\dots \dots \dots (2)$$

$P(\delta)$: gaya *instantaneous*

P_m : harga rata-rata dari gaya *instantaneous*.

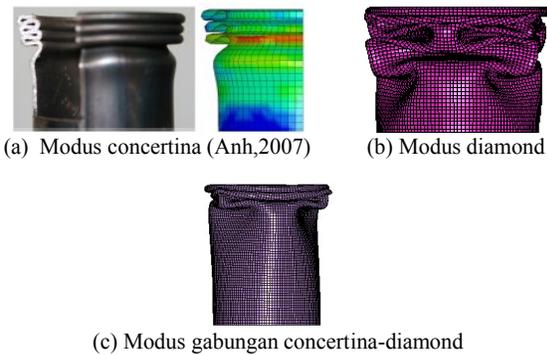
Mean crushing force dapat ditentukan berdasarkan geometri deformasi yang terjadi. Nilai mean crushing telah dinormalisasi adalah sebagai berikut (3) :

$$\dots \dots \dots (3)$$

Dimana M_p adalah momen lentur plastis:

$$\dots \dots \dots (4)$$





Gambar 3 Modus-modus deformasi

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan untuk kasus tumbukan berkecepatan rendah pada tabung baja lingkaran berdinding tipis, maka terdapat 3 klasifikasi modus deformasi yang terjadi (21) (18):

1. Concertina: modus deformasi axisimetrik dengan terjadinya lipatan berurutan yang dimulai pada salah satu ujung tabung seperti ditunjukkan oleh gambar 3.a.
2. Diamond: modus non-axisimetrik tapi lipatan yang berurutan terjadi bersamaan dengan perubahan bentuk penampang tabung seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.b.
3. Gabungan concertina dengan diamond 2 lobe atau 3 lobe. Pelipatan pertama merupakan modus concertina yang kemudian berubah menjadi diamond, dengan jumlah lobe 2 (elips), 3 (segitiga), 4 (persegi panjang) atau 6 (hexagonal), seperti ditunjukkan pada gambar 3.c.

3. Pemodelan Menggunakan FEM

Simulasi numerik tumbukan aksial berkecepatan rendah pada tabung lingkaran berdinding tipis dilakukan menggunakan LS-DYNA 970 *Double Precision*. Satuan yang digunakan dalam pemodelan elemen hingga ini dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1 Satuan dalam pemodelan

Parameter	Satuan	Parameter	Satuan
Panjang	mm	Modulus Young	GPa
Massa	kg	Tegangan	GPa
Waktu	ms	Energi	Joule
Massa jenis	kg/mm ³	Kecepatan	mm/ms
Gaya	kN		

3.1 Tabung

Tinggi tabung silinder berdinding tipis yang digunakan pada simulasi adalah 190 mm, dan geometri tabung dianggap sempurna. Semua tabung dimodelkan menggunakan elemen Belytschko-Tsay. Uji konvergensi menunjukkan bahwa besar elemen yang optimal untuk mendapatkan hasil numerik yang detail dalam waktu yang singkat yaitu 2x2 mm untuk setiap elemen. Namun,

pada tabung lingkaran hal ini sulit diaplikasikan sehingga digunakan pendekatan terhadap ukuran elemen tersebut. Gambar 4. menunjukkan model tabung silinder yang telah diberi *meshing*.



Gambar 4 Tabung silinder yang telah diberi *meshing*

Material yang digunakan untuk spesimen tabung lingkaran berdinding tipis merupakan material *polyvinyl chloride* (PVC) yang sifat mekaniknya diperoleh melalui uji tarik, seperti ditampilkan pada tabel 2.

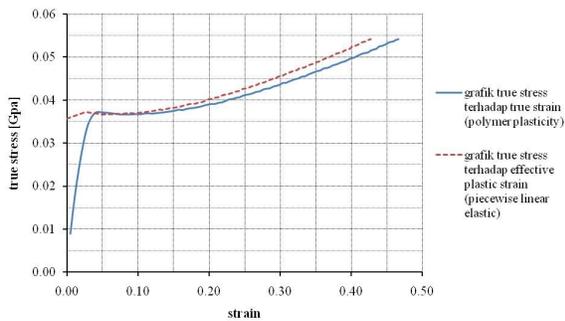
Tabel 2 Sifat mekanik material PVC

Modulus Young (E)	1.39 GPa
Massa jenis (ρ)	1530 x 10 ⁻⁹ kg/mm ³
Ratio Poisson (ν)	0.37
Ultimate Strength (σ_u)	37 MPa

Pemilihan model material dalam simulasi tumbukan mempengaruhi karakteristik deformasi dan penyerapan energi oleh tabung. Pada simulasi numerik ini digunakan dua jenis model material yaitu material *piecewise linear elastic* dan material *polymer plasticity*. Material *piecewise linear elastic* merupakan material isotropik elastoplastik yang digunakan untuk memodelkan material logam dan plastik, sedangkan material *polymer plasticity* merupakan material isotropik elastik-viskoplastik yang hanya dapat memodelkan material jenis polimer. Pada model *piecewise linear elastic* daerah elastis material dilinierisasikan sehingga daerah elastis ini digantikan oleh parameter *modulus Young* dan daerah plastis diwakili oleh kurva *effective plastic strain - true stress*. Pada model *polymer plasticity* tidak terdapat adanya linearisasi daerah elastis dan data material sifat material diwakili oleh kurva *true stress - true strain*.

Dalam simulasi ini dilakukan perbandingan karakteristik modus deformasi dan harga *mean crushing force* untuk dua model material tersebut. Kaji perbandingan ini diperlukan untuk menentukan model material yang cocok digunakan dalam simulasi impak tabung PVC. Model material *piecewise linear elastic* dan *polymer plasticity* yang disusun berdasarkan hasil uji tarik ditunjukkan pada gambar 5.





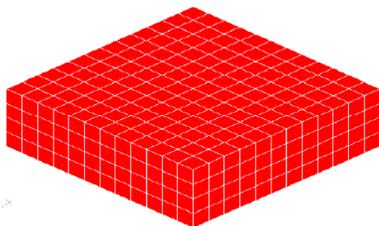
Gambar 5 Load curve pada input data material piecewise linear elastic dan polymer plasticity

3.2 Penumbuk (Impactor)

Penumbuk dibuat berbentuk balok persegi panjang dengan panjang sisi 120 mm dan tinggi 35 mm dan massa 25 kg. Penumbuk diasumsikan sebagai solid yang jauh lebih kaku daripada tabung sehingga jumlah elemen pada penumbuk tidak berpengaruh terhadap simulasi. Material penumbuk dimodelkan sebagai material *rigid*, dengan sifat mekanik ditunjukkan pada tabel 3. Model penumbuk ditunjukkan pada gambar 6.

Tabel 3 Sifat mekanik material penumbuk

E (Modulus Young)	200 GPa
ν (Ratio Poisson)	0.3
ρ (massa jenis)	1.98×10^{-4} kg/mm ³



Gambar 6 Model penumbuk

3.3 Pembebanan dan kondisi batas

Pada simulasi, pembebanan terhadap tabung dinyatakan sebagai kecepatan awal penumbuk sebesar 7.3 m/s dalam arah sumbu z (arah aksial) dan tabung diklem pada bagian bawah. Untuk itu, derajat kebebasan node dalam model tabung dan penumbuk dibatasi menurut tabel 4.

Tabel 4 Kondisi batas

Node	Translasi			Rotasi		
	x	y	z	x	y	z
Penumbuk (semua)	1	1	0	1	1	1
Tabung (dasar tabung)	1	1	1	1	1	1
Tabung (selain dasar tabung)	0	0	0	0	0	0

Catatan: 1: *constrained*, 0: *not constrained*.

3.4 Kondisi kontak

Untuk mendapatkan simulasi yang realistis, dimana terjadinya *overlap* pada saat dua buah benda melakukan kontak harus dihindari, diperlukan dua jenis kontak. Jenis kontak pertama, *automatic node to surface*, digunakan untuk kontak antara penumbuk dengan tabung. Jenis kontak kedua, *automatic single surface*, digunakan pada dinding-dinding tabung, yang berfungsi untuk mencegah penetrasi antar dinding tabung selama terjadinya *progressive buckling*. Parameter yang digunakan dalam kontak permukaan adalah koefisien gesek statik dan dinamik.

3.5 Parameter simulasi

Untuk menentukan panjang waktu simulasi, digunakan parameter *termination time* sebesar 25 ms, yang dapat mencakup seluruh proses buckling hingga seluruh energi kinetik penumbuk terserap.

Visualisasi output diperoleh menggunakan parameter D3PLOT dengan interval waktu sebesar 0.1 ms. Dengan demikian terdapat 250 step hingga ENDTIME. File D3PLOT ini dapat disimpan menjadi file video dengan menggunakan perangkat lunak *postprocessing*.

Data waktu terhadap displacement diperoleh menggunakan parameter RBDOUT. Interval waktu yang digunakan sebesar 0.005 ms sehingga data *time-displacement* yang diperoleh sebanyak 5000 data. Data waktu terhadap gaya diperoleh menggunakan parameter RCFORCE. Interval waktu yang dipakai sebesar 0.005 ms sehingga diperoleh data sebanyak 5000 data. Data *time-displacement* dan data *time-force* kemudian diproses menjadi data *force-displacement* selama proses tumbukan dengan memanfaatkan program *spreadsheet*.

4. Simulasi dan Analisis

4.1 Prosedur Simulasi

Untuk mengetahui pengaruh berbagai parameter terhadap modulus deformasi dan *mean crushing force* tabung PVC, dilakukan beberapa kajian. Parameter yang dikaji adalah model material, koefisien gesek statik, koefisien gesek dinamik, ketebalan tabung dan radius tabung.

Tabel 5 menunjukkan jenis parameter yang dikaji dan nilai parameter lain yang dijaga konstan dalam simulasi. Dengan cara ini pengaruh tiap parameter dapat dikaji secara sistematis.

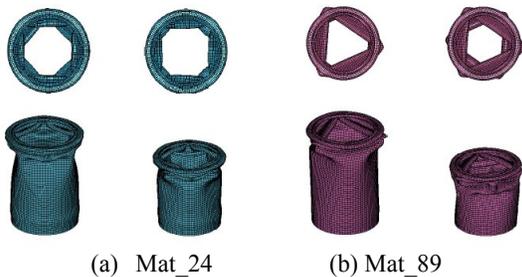
4.2 Pengaruh model material

Gambar 7 menunjukkan modulus deformasi hasil simulasi dampak pada tabung dengan dua model material, yaitu piecewise linear elastic (Mat_24) dan polymer plasticity (Mat_89). Gambar tersebut diambil pada saat time step 125 dan 252 (12.4 ms dan 25 ms).

Tabel 5 Kaji parameter yang dilakukan dalam simulasi dampak



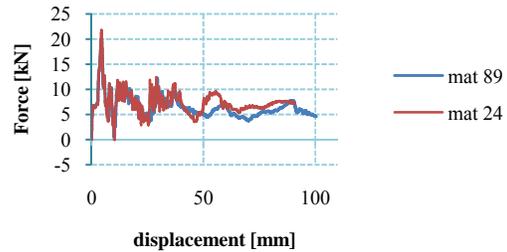
No	Parameter yang dikaji	Parameter tetap
1	Jenis material: Piecewise linear elastic (Mat_24) Polymer plasticity (Mat_89)	t : 2.4 mm R: 42 mm
2	Koef gesek statik μ_k : 0.11, 0.12, 0.13., 0.14, 0.15	t : 2.4 mm R: 42 mm μ_s : 0.2
3	Koef gesek dinamik μ_s : 0.3, 0.4, 0.5., 0.6, 0.7	t : 2.4 mm R: 42 mm μ_k : 0.2
4	Radius tabung R: 21, 24, 30, 38,44.5 mm	t: 2.4 mm MAT_89
5	Tebal tabung t: 2, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8 mm	R: 42 mm MAT_89



Gambar 7 Hasil simulasi untuk dua jenis model material yang berbeda pada saat 12.4 ms dan 25 ms.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kedua tabung mengalami deformasi dengan modus *diamond multiple lobe* namun jumlah lobe berbeda. Pada tabung yang menggunakan model material_24, deformasi berbentuk segiempat sedangkan yang menggunakan model material_89 deformasi berbentuk segitiga.

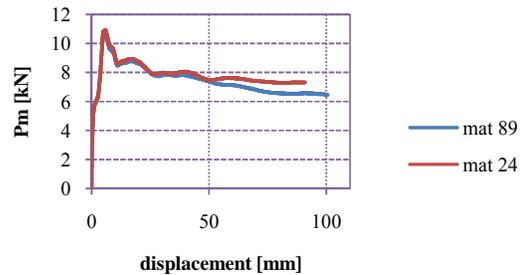
Gambar 8 menunjukkan *instantaneous force* dari dua jenis model material dimana gaya yang terjadi selama tabung terdeformasi berbeda. Gambar 9 menunjukkan harga *mean crushing force* (P_m) untuk tabung dengan dua model material tersebut. Harga *mean crushing force* untuk model material *piecewise linear elastic* lebih tinggi dibandingkan dengan model material *polymer plasticity* karena adanya linearisasi daerah elastis sedangkan perpindahannya lebih kecil dibandingkan dengan material *polymer plasticity*. Hal ini sesuai dengan prinsip energi dimana karena energi impact yang diserap oleh kedua tabung sama besar maka tabung yang memiliki mean crushing force lebih tinggi akan mengalami deformasi lebih pendek.



Gambar 8 Instantaneous crushing force pada tabung dengan dua model material

Tabel 6 Nilai mean crushing force untuk dua model material

Model material	P_m [kN]	Selisih P_m [%]
MAT 89	6.47	13.10
MAT 24	7.32	



Gambar 9 Mean crushing force pada tabung dengan dua model material

4.3 Pengaruh koefisien gesekan

Pengaruh koefisien gesek statik dan dinamik terhadap nilai P_m dapat dilihat pada tabel 7. Hasil-hasil ini menunjukkan bahwa koefisien gesek dinamik tidak mempengaruhi nilai P_m , dan koefisien gesek statik memiliki pengaruh yang kecil terhadap nilai P_m . Secara praktis koefisien gesek tidak berpengaruh terhadap nilai P_m dalam kasus tumbukan berkecepatan rendah pada tabung PVC berpenampang lingkaran.

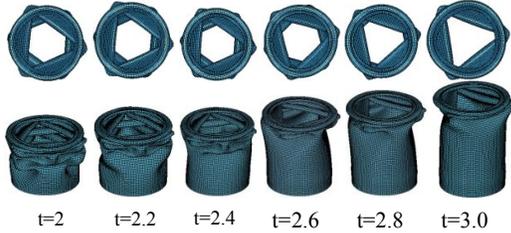
Tabel 7 Pengaruh koefisien gesek terhadap P_m

μ_k	μ_s	P_m [kN]	Beda [%]
0.11	0.2	6.29	-
0.12		6.29	0
0.13		6.29	0
0.14		6.29	0
0.15		6.29	0
0.2	0.3	6.47	-
	0.4	6.50	0.44
	0.5	6.50	0.52
	0.6	6.59	1.94
	0.7	6.72	3.87

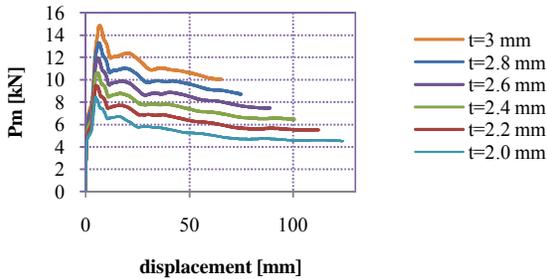
4.4 Pengaruh ketebalan tabung



Gambar 10 menunjukkan hasil simulasi dampak pada tabung dengan radius 42 mm dan tebal berbeda-beda, dan gambar 11 menunjukkan P_m yang diproses dari data instantaneous crushing force.



Gambar 10 Deformasi tabung PVC akibat dampak untuk ketebalan yang bervariasi

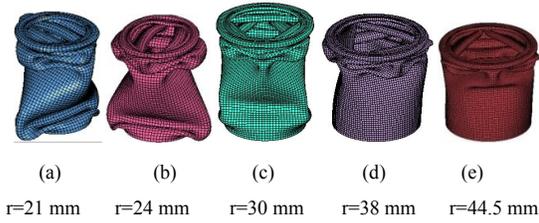


Gambar 11 Pengaruh ketebalan tabung terhadap mean crushing force tabung PVC

Hasil-hasil ini menunjukkan bahwa semua tabung mengalami deformasi dengan modus yang serupa yaitu dimulai dengan modus concertina dan selanjutnya berubah menjadi *diamond* segitiga. Hanya perpindahan total yang terjadi berbeda, dimana semakin tebal dinding tabung semakin pendek perpindahannya. Gambar 11 menunjukkan bahwa P_m semakin tinggi jika tabung semakin tebal. Dapat disimpulkan bahwa ketebalan tabung mempengaruhi besarnya nilai P_m , namun bentuk deformasi tabung tidak berubah.

4.5 Pengaruh radius tabung

Gambar 12 menunjukkan bentuk deformasi tabung akibat dampak pada tabung dengan tebal 2 mm dan radius bervariasi. Dapat dilihat bahwa semua tabung mengalami deformasi awal dengan modus concertina dan kemudian menjadi *diamond*, dimana untuk radius kecil ($r=21$ mm dan 24 mm) berbentuk *diamond* elips, sedangkan untuk r yang lebih besar berbentuk *diamond* segi-tiga. Untuk r yang kecil, deformasi tahap akhir berbentuk *diamond* elips.

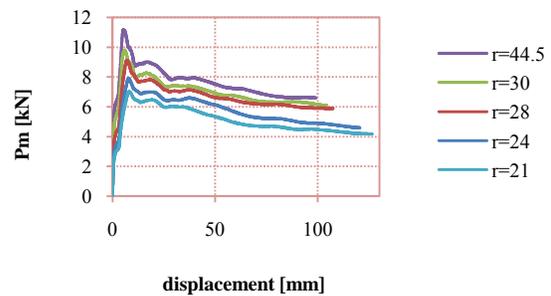


Gambar 12 Karakteristik modus deformasi untuk diameter tabung yang berbeda

Gambar 12 menunjukkan P_m untuk tabung-tabung tersebut dan tabel 9 menunjukkan nilai P_m tersebut. Dapat dilihat bahwa semakin besar radius tabung semakin besar gaya yang dibutuhkan untuk mengakibatkan deformasi. Dapat disimpulkan bahwa radius tabung tidak hanya mempengaruhi besarnya nilai P_m , namun juga mempengaruhi bentuk deformasi yang terjadi. Gambar 10 dan 12 menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan tabung sebesar 50% (2 mm ke 3 mm) meningkatkan P_m hampir 100%, sedangkan peningkatan radius sebesar 111% (21 mm ke 44.5 mm) hanya meningkatkan P_m sekitar 60%.

Tabel 8 Pengaruh diameter terhadap mean crushing force

Radius [mm]	P_m [kN]	perbedaan [%]
21	4.17	-
24	4.60	11.56
30	5.90	32.12
38	6.12	34.90
44.5	6.61	43.47



Gambar 13 Pengaruh diameter tabung terhadap mean crushing force

Tabel 9 Pengaruh rasio t/D terhadap modus deformasi dan nilai P_m/M_0

r [mm]	t [mm]	t/D	Modus deformasi	P_m/M_0 teoritik	P_m/M_0 numerik	Selisih [%]
42.0	2.0	0.024	segi-tiga	160.72	139.17	13.41



42.0	2.2	0.026	segi-tiga	154.57	138.26	10.55
44.5	2.4	0.027	segi-tiga	152.75	139.52	8.66
42.0	2.4	0.029	segi-tiga	149.22	136.78	8.34
42.0	2.6	0.031	segi-tiga	144.51	134.46	6.96
38.0	2.4	0.032	segi-tiga	143.36	129.18	9.89
42.0	2.8	0.033	segi-tiga	140.32	133.68	4.74
42.0	3.0	0.036	segi-tiga	136.57	125.9	7.81
30.0	2.4	0.040	segi-tiga	130.70	124.54	4.71
24.0	2.4	0.050	elips	120.13	97.10	19.18
21.0	2.4	0.057	elips	114.4	88.02	23.06

4.6 Pengaruh rasio t/D

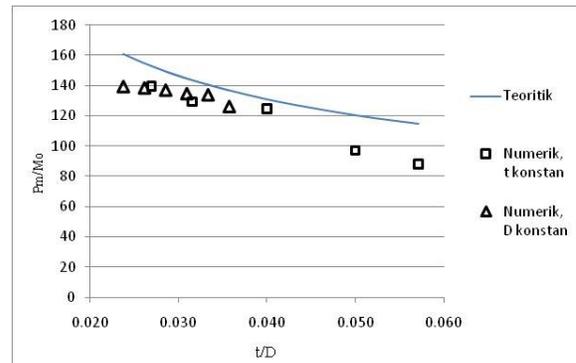
Hasil-hasil simulasi untuk ketebalan dan radius yang bervariasi disusun berdasarkan parameter non dimensional t/D yang menggambarkan geometri tabung, seperti ditunjukkan pada tabel 9. Dapat dilihat bahwa semua deformasi yang didapat memiliki modulus gabungan yang dimulai dengan modulus concertina dan berubah menjadi modulus diamond segitiga (untuk $t/D < 0.05$) atau diamond elips (untuk $t/D \geq 0.05$). Hasil-hasil ini sesuai dengan hasil yang diperoleh Andrews (1982), yang menyatakan bahwa semakin besar rasio t/D semakin rendah jumlah *lobe* pada lipatan modulus diamond, dan pada tabung yang berdinding tipis modulus deformasi yang terjadi adalah murni modulus diamond jika memiliki rasio $t/D \leq 0.016$. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa rasio t/D menentukan bentuk modulus deformasi yang terjadi.

4.7 Harga P_m/M_0 terhadap t/D

Untuk membandingkan harga P_m yang didapat dengan mengabaikan material dan geometri tabung, digunakan plot parameter non-dimensional P_m/M_0 terhadap t/D , dimana M_0 adalah momen lentur plastis yang menggambarkan material tabung. Harga P_m/M_0 yang diperoleh dari simulasi dengan variasi radius dan ketebalan sebagai fungsi t/D ditunjukkan pada tabel 9 dan ditampilkan pada gambar 14. Harga P_m/M_0 teoritik juga diberikan untuk perbandingan.

Berdasarkan Tabel 9, perbedaan terbesar antara harga P_m/M_0 yang didapat secara numerik dengan yang didapat secara teoritik adalah sekitar 20 % yaitu untuk $t/D \geq 0.5$. Perbedaan yang cukup besar ini terjadi karena modulus deformasi tabung dengan $t/D \geq 0.5$ berbentuk diamond elips, bukan diamond segi-tiga seperti pada tabung dengan $t/D < 0.5$.

Berdasarkan gambar 14, semakin tinggi rasio t/D maka harga P_m/M_0 semakin turun. Kecenderungan nilai P_m/M_0 yang diperoleh secara numerik ini sama dengan prediksi secara analitik.



Gambar 14 P_m/M_0 sebagai fungsi t/D

5. Kesimpulan

Simulasi beban impact pada tabung PVC telah dilakukan menggunakan perangkat lunak LS-DYNA. Dari hasil-hasil yang diperoleh, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Penggunaan model material Mat_89 untuk material PVC lebih tepat karena pemakaian material ini memberikan bentuk deformasi yang lebih sesuai dengan hasil peneliti lain dibandingkan dengan model Mat_24.
2. Harga koefisien gaya gesek dinamik tidak berpengaruh terhadap nilai P_m , dan koefisien gesekan statik memberi sedikit perubahan pada P_m .
3. Peningkatan ketebalan lebih efektif mempengaruhi harga P_m dibandingkan dengan peningkatan radius tabung. Peningkatan ketebalan tabung sebesar 50% (2 mm ke 3 mm) meningkatkan P_m hampir 100%, sedangkan peningkatan radius sebesar 111% (21 mm ke 44.5 mm) hanya meningkatkan P_m sekitar 60%.
4. Semakin besar rasio t/D , maka jumlah *lobe* pada lipatan modulus diamond akan semakin banyak jumlahnya. Hal ini terlihat dari modulus deformasi diamond pada tabung PVC untuk rasio $t/D \geq 0.05$ dengan jumlah *lobe* 2 (elips), dan untuk rasio $t/D < 0.05$, jumlah *lobe* adalah 3 (segi tiga).
5. Deformasi yang terjadi pada tabung PVC dalam simulasi berupa modulus gabungan concertina dan diamond sesuai dengan hasil yang diperoleh oleh peneliti lain (21).

Acknowledgements

Penelitian tentang impact kecepatan rendah batang prismatik ini didukung oleh Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi RI melalui program Hibah Bersaing dan Hibah Kompetisi 2009-2010.



Daftar Pustaka

1. **Frank, T. dan Gruber, K.** *Numerical Simulation of Frontal Impact and Offset Collision*. Cray Research Inc., CRAY Channels:2-6. 1992.
2. *Axial Crushing of Multicorner Sheet Metal Columns*. **Abramowicz, W. dan Jones, N.** 1989, Journal of Applied Mechanics, No.1, Vol.56, hal. 113-120.
3. *Dynamic Axial Crushing of Circular Tubes*. **Abramowicz, W. dan Jones, N.** 1984, Int. Journal of Impact Engineering, Vol.2, No.3, hal. 263-281.
4. *Dynamic Axial Crushing of Square Tubes*. **Abramowicz, W. dan Jones, N.** 1984, Int. Journal of Impact Engineering, Vol.2 No.2, hal. 179-208.
5. *Dynamic Progressive Buckling of Circular and Square Tubes*. **Abramowicz, W. dan Jones, N.** 1986, Int. Journal of Impact Engineering, hal. 243-270.
6. *On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures*. **Abramowicz, W. dan Wierzbicki, T.** 1983, Journal of Applied Mechanics, Vol. 50, hal. 727-734.
7. *Modeling of Impact Dynamics: A Literature Survey*. **Faik, S. dan Witteman, H.** 2000. ADAMS User Conference.
8. *Crashworthiness of Light-weight Aotomotive Structures*. **Langseth, Magnus.** 2003. Norlight Conference.
9. *Energy Absorbing Effectiveness Factor*. **Jones, N.** 2009, Int. Journal of Impact Engineering, hal. 1-12.
10. **Anh, L.H.** *Behaviour of Thin-Walled Prismatic Structures Subjected to Low Velocity Impact Loading*. Bandung : Program Studi Teknik Penerbangan ITB, 2007. Thesis Master.
11. **Arindah, N.** *Kaji Parametrik Tumbukan Berkecepatan Rendah pada Tabung Lingkaran Berdinding Tipis yang Terbuat dari Material PVC*. Program Studi Aeronotika dan Astronotika, ITB. 2010. Tugas Akhir.
12. *Low Velocity Impact Analysis of Prismatic Structure using Finite Element Method*. **Jusuf, A., et al.** Kuala Lumpur, Malaysia : s.n., June 7th-9th 2010. FEOFS 8th International Conference on Fracture and Strength of Solids.
13. *Low Velocity Impact Analysis of Foam Filled Double Prismatic Columns*. **Mora, M., et al.** Shah Alam, Malaysia : s.n., June 24-25 2009. ICAME 2009 International Conference on Advances in Mechanical Engineering.
14. *Impact Analysis of Thin-Walled Prismatic Columns*. **Wirayudha, I., et al.** Shah Alam, Malaysia : s.n., June 24-25 2009. ICAME 2009 International Conference on Advances in Mechanical Engineering.
15. *Collapse Behaviour of Plastic Tubes Filled with Sawdust*. **Singace, A.A. dan El-Sobky, H.** 2000, Thin-Walled Structures, Vol. 37, hal. 163-187.
16. *Advance in the Measurement and Modeling of Plastic for Impact Simulation*. **Lobo, H.** 2006, June 4-6. 9th International LS-DYNA Users Conference.
17. *Finite Element Simulation of Internally Grooved Thin-Walled PVC Tubes Subjected to Axial Plastic Collapse*. **Mamalis, A.G., et al.** 4, International Journal of Crashworthiness, Vol. 9, hal. 434-441.
18. *On The Inextensional Axial Collapse of Thin PVC Conical Shells*. **Mamalis, A.G., et al.** 5, 1986, Int. Journal of Impact Engineering, Vol. 28, hal. 323-335.
19. *The Axial Crushing of Thin PVC Tubes and Frusta of Square Cross Section*. **Mamalis, A.G., et al.** 3, Int. Journal of Impact Engineering, Vol. 8, hal. 241-264.
20. *The Inextensional Collapse of Thin Walled Cylinders of PVC under Axial Loading*. **Mamalis, A.G., et al.** 1, 1986, Int. Journal of Impact Engineering, Vol. 4, hal. 41-56.
21. *Classification of Axial Collapse of Cylindrical Tubes Under Quasi Static Loading*. **Andrews, K.R.F., England, G.L. dan Ghani, E.** 1983, Int. Journal Mechanical Science, Vol.25, No.9-10, hal. 687-696.



