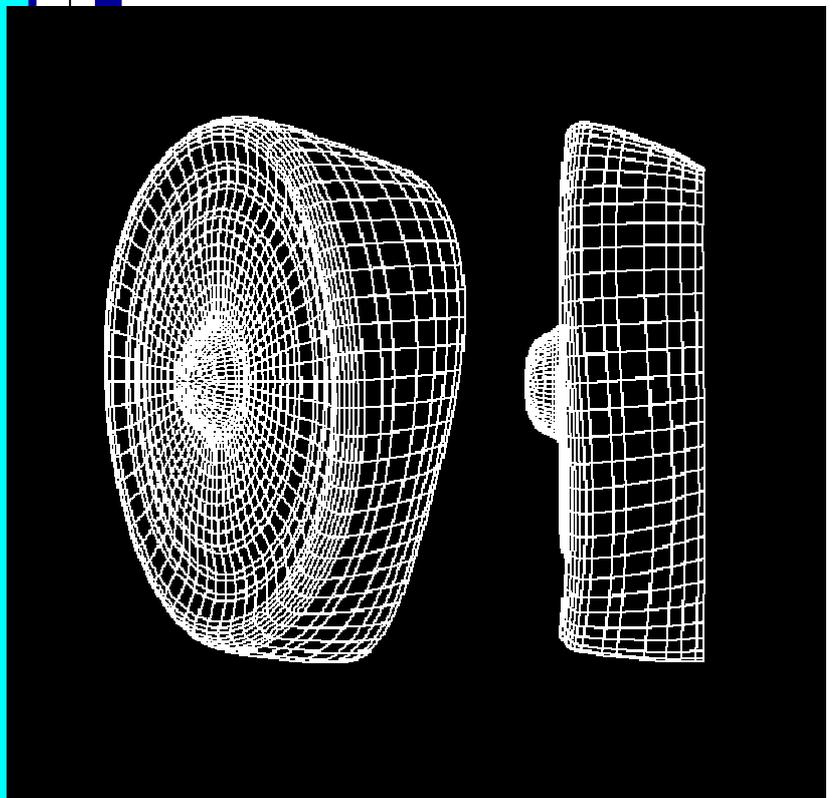


Jurnal Teknik Mesin
Volume 21, No.2, Oktober



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

KARAKTERISTIK MODUL PENYERAP ENERGI IMPAK MEKANISME *INTERNAL INVERSION* DAN *AXIAL SPLITTING*

Rachman Setiawan, Muhammad Hisyam Amir,
Bambang Sugiharto dan Sigit Fajrianto

Kelompok Keahlian Perancangan Mesin, FTI ITB,
Jl. Ganesha 10, Bandung 40132
E-mail: rachmans@edc.ms.itb.ac.id

RINGKASAN

Penerapan teknologi *crashworthiness* pada suatu wahana memiliki tujuan melindungi penumpang maupun muatan dari efek tabrakan/impak. Salah satu konsep rancangan dalam teknologi ini adalah penggunaan modul penyerap impact. Dua di antara bermacam mekanisme adalah mekanisme *internal inversion* dan *axial splitting*. Makalah ini menyajikan hasil simulasi numerik dan eksperimental kedua mekanisme tersebut. Simulasi numerik dilakukan menggunakan software LS-Dyna untuk memodelkan kasus *drop test*. Hasil simulasi ditampilkan dalam hubungan antara parameter geometri dan material, dengan parameter *crashworthiness*, antara lain penyerapan energi impact dan gaya respon. Beberapa kasus simulasi juga diverifikasi dengan hasil eksperimental kuasi-statik dan *drop test*.

ABSTRACT

The application of *crashworthiness* technology to a vehicle has a main objective of protecting the passenger or cargo from the effects of impact/collision. One of the strategies is by using impact energy absorbing (IEA) modules. Two of the alternatives of IEA modules are metallic tubes with *internal inversion* and controlled *axial splitting* mechanism. This paper presents both numerical and experimental approaches to understand the characteristics of the two mechanisms, before using them in design phase. LS-Dyna was used as the numerical simulation software for *drop test* case. The result of simulation is presented as the relationships between geometrical parameters and the *crashworthiness* parameters, e.g. impact energy and response force. Some cases are compared with quasi-static and *drop test* results.

Keywords: *Crashworthiness, Impact energy absorber modul*

1. PENDAHULUAN

Crashworthiness didefinisikan sebagai kemampuan suatu struktur untuk melindungi kargo maupun penumpang ketika terjadi tabrakan (*impact*). Struktur yang *crashworthy* adalah struktur yang mampu menyerap sebagian energi tabrakan, menyelamatkan bagian berpenumpang, mencegah benturan dengan objek luar, mencegah terlemparnya penumpang dan membatasi perlambatan.

Beberapa kriteria dapat digunakan untuk menentukan tingkat keselamatan dalam perancangan kendaraan penumpang dengan konsep *crashworthiness*, antara lain

seperti pada Tabel 1. *Head injury criteria* (HIC), misalnya, didefinisikan sebagai [1],

$$HIC = \left[\frac{1}{t_1 - t_2} \int_{t_1}^{t_2} a \cdot dt \right]^{2.5} (t_1 - t_2) \quad (1)$$

dengan,

a = perlambatan resultan (m/s^2)

t_1 = awal rentang waktu (s)

t_2 = akhir rentang waktu (s)

Tabel 1. Perbandingan Beberapa Kriteria Keselamatan Penumpang [1]

| Kode AIS | HIC | Head Injury | Chest Deceleration | Chest Injury |
|----------|-------------|---|--------------------|--|
| 1 | 135 – 519 | Pusing | 17 – 37 gs | Patah satu buah tulang rusuk |
| 2 | 520 – 899 | Pingsan kurang dari 1 jam; patah tulang linier | 38 – 54 gs | 2 sampai 3 tulang rusuk patah; retak tulang dada |
| 3 | 900 – 1254 | Pingsan antara 1 sampai 6 jam; retak tulang kepala (didalam) | 55 – 68 gs | lebih dari 4 tulang rusuk patah; 2 – 3 tulang rusuk patah dengan kondisi hemothorax/pneumothorax |
| 4 | 1255 – 1574 | Pingsan antara 6 sampai 24 jam; retak tulang kepala (terbuka) | 69 – 79 gs | lebih dari 4 tulang rusuk patah dengan kondisi hemothorax/pneumothorax; dada hancur |
| 5 | 1575 – 1859 | Pingsan lebih dari 24 jam; pendarahan hebat. | 80 – 90 gs | Aorta terkoyak (terputus sebagian) |
| 6 | >1860 | Meninggal | > 90 gs | Meninggal |

Dari definisi HIC (Pers. 1), juga kriteria-kriteria lain, terlihat bahwa kriteria keselamatan tergantung kepada perlambatan dan durasi penumpang terkena perlambatan tersebut. Semakin besar nilai perlambatan dan rentang waktu, semakin besar nilai HIC, sekaligus akan semakin besar konsekuensi kerusakan kepala manusia. Konsep inilah yang dimanfaatkan dalam perancangan struktur kendaraan dengan konsep *crashworthiness*.

Konsep *crashworthiness* dapat diterapkan pada rancangan kendaraan secara keseluruhan. Energi dampak akan diserap oleh sebagian struktur kendaraan selama kolaps. Konsep ini juga dapat diterapkan dengan merancang suatu komponen yang khusus berfungsi untuk menyerap sebagian energi dampak dalam jumlah tertentu, sebelum terjadi kolaps struktur utama kendaraan. Komponen tersebut dinamakan modul penyerap dampak. Keuntungan pemakaian modul ini antara lain:

- Geometri relatif sederhana
- Karakteristik kuasi-statik mendekati ideal, yaitu memiliki respon gaya yang relatif rata pada sepanjang stroke-nya
- Karakteristik relatif mudah diprediksi karena memiliki korelasi yang cukup baik dengan parameter dimensinya

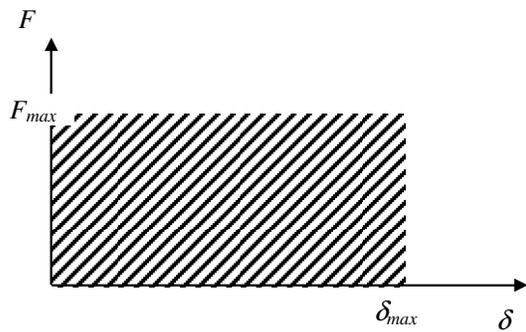
Implementasi perancangan dengan optimasi geometri modul penyerap dampak memerlukan pemahaman yang cukup, baik yang diperoleh secara analitik, pengujian, maupun numerik. Solusi analitik eksplisit maupun implisit sebenarnya dapat menjadi pendekatan yang baik untuk optimasi perancangan. Namun, sejauh ini solusi analitik terbentur pada kesulitan pemodelan plastisitas dan dampak laju regangan tinggi pada sifat mekanik material saat mengalami dampak. Dengan metode numerik, masalah struktur dengan pembebanan dampak sehingga menimbulkan plastisitas besar dan dengan laju regangan yang tinggi dapat dimodelkan secara integrasi eksplisit. Software yang mengadopsi integrasi eksplisit dalam analisis elemen hingganya, sehingga dapat digunakan untuk analisis dampak, antara lain adalah LS-Dyna, Ansys/LS-Dyna, Pam-CRASH, MSC/Dytran.

Dengan pertimbangan aplikasi, perancangan modul penyerap dampak diarahkan menggunakan pendekatan optimasi global berbasis pengetahuan (*knowledge-based design*). Untuk itu basis data perancangan yang komprehensif diperlukan, baik yang diperoleh dari hasil pengujian maupun hasil analisis numerik yang akurat. Dalam penelitian ini, basis data diperoleh dari hasil analisis parametrik dengan menggunakan metode elemen hingga. Software LS-Dyna digunakan pada tahap awal, dan selanjutnya Ansys/LS-Dyna akan digunakan, dengan pertimbangan kemudahan analisis parametrik dan stabilitas software induk. Hasil pengujian digunakan sebagai verifikasi solusi elemen hingga.

Mekanisme penyerapan dampak yang dicoba adalah *internal inversion* dan *controlled axial splitting*. Untuk kedua mekanisme tersebut, modul dibuat dari silinder metalik yang dipasang pada landasan metal lain sehingga dapat menimbulkan kolaps seperti yang diperkirakan. Parameter yang diamati adalah respon gaya terhadap perpindahan, respon gaya terhadap waktu dan jumlah energi yang dapat diserap. Selanjutnya, pengaruh dimensi modul terhadap parameter-parameter tersebut diamati.

2. MODUL PENYERAP DAMPAK

Modul penyerap energi dampak merupakan elemen struktur mekanik yang digunakan untuk menyerap energi dampak sebagai akibat terjadinya tabrakan. Hal yang sangat fundamental yang harus dimiliki oleh modul penyerap energi dampak adalah kemampuannya dalam mendisipasi energi kinetik ketika terjadi tabrakan sesuai dengan standar *crashworthiness* dan pada akhirnya kriteria keselamatan penumpang. Secara ideal, modul penyerap dampak memiliki penyerapan dampak yang sempurna jika memiliki karakteristik seperti pada Gambar 1. Gaya maksimum, F_{max} , dibatasi oleh kriteria keselamatan. Untuk memaksimalkan jumlah energi dampak yang dapat diserap, respon yang datar diperlukan. Analisis secara lebih rinci memerlukan data/prediksi respon gaya terhadap waktu yang diperoleh melalui simulasi.



Gambar 1. Karakteristik penyerapan impact ideal oleh modul/struktur

Jones dan Wierzbicki [2], menyusun hasil penelitian mengenai berbagai modul penyerap impact oleh para peneliti. Acuan utama lainnya dalam bidang impact, *crashworthiness* dan modul penyerap impact, antara lain dapat dirujuk pada Ref. [3-5]. Reid dan Harrigan [6] menyajikan penjelasan mekanisme *internal inversion* sekaligus pendekatan analitiknya, sedangkan Huang et al [7] melaporkan beberapa karakteristik *controlled axial splitting* dengan dies berbentuk konus. Dari penelitian tersebut, diperoleh gambaran karakteristik penting mendekati karakteristik ideal pada Gambar 1.

Dalam makalah ini, simulasi impact pada mekanisme *internal inversion* dan *controlled axial splitting* akan dibahas, baik secara numerik maupun melalui pengujian. Solusi numerik diperoleh dari analisis elemen hingga menggunakan software LS-Dyna, sedangkan pengujian dilakukan dengan pembebanan kuasi-statis maupun *drop test*. Diharapkan dari penelitian awal ini simulasi numerik yang terbaik dalam memprediksi karakteristik impact modul dapat diperoleh, dengan pemilihan parameter-parameter simulasi yang tepat dalam software LS-Dyna. Tahap penelitian selanjutnya akan menggunakan simulasi yang akurat tersebut untuk menyusun basis data perancangan modul penyerap impact untuk berbagai aplikasi.

3. SIMULASI ELEMEN HINGGA

Analisis numerik dilakukan dengan menggunakan program berbasis elemen hingga LS-DYNA v.970 [8]. Pemodelan (*preprocessing*) dilakukan dengan menggunakan ETA FEM PC Pre-Processor 28

sedangkan hasil keluaran analisis (*postprocessing*) ditampilkan oleh program LSTC/LS Post-Processor.v1.0.

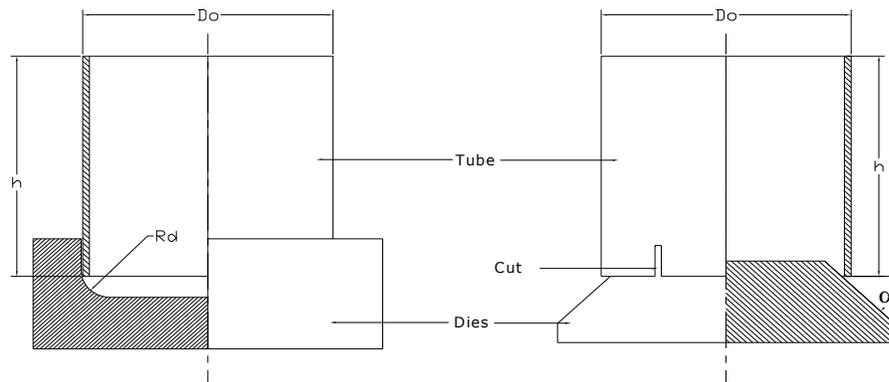
LS-Dyna adalah perangkat lunak berdasarkan metode elemen hingga dengan kemampuan kalkulasi numerik eksplisit yang dapat dipakai untuk kasus-kasus transien. Kemampuan lain dari perangkat lunak ini meliputi:

- Pemodelan efek inersia dalam penghitungan respon gaya pada kasus impact dengan kecepatan tinggi
- Fasilitas pemodelan kontak dua permukaan
- Perbendaharaan tipe elemen yang mengakomodasi plastisitas material, *strain rate effects* maupun pemodelan benda kaku

Material dimodelkan menggunakan model Material *Piecewise Linear Plasticity*. Input utama model ini adalah sejumlah pasangan titik yang mewakili kurva plastis dari material yang dipakai dalam simulasi, yang diperoleh dari pengujian.

Penentuan tipe elemen untuk analisis elemen hingga, khususnya untuk pipa, merupakan hal penting yang menentukan keberhasilan dan akurasi simulasi. Secara garis besar, pemodelan solid dengan kemampuan deformasi plastis tinggi dan mengakomodasi *strain rate effects* dilakukan dengan menggunakan *Brick element*. Ada dua pilihan dalam *brick element*, yaitu 8 nodal masing-masing 3 derajat kebebasan, atau 8 nodal masing-masing 6 derajat kebebasan. Pilihan kedua merupakan penyederhanaan dari elemen 20 nodal (kuadratik) masing-masing 3 derajat kebebasan. Keenam derajat kebebasan meliputi translasi 3 dimensi dan rotasi 3 dimensi. Kedua tipe elemen telah dicoba, dengan hasil pilihan kedua cenderung menghasilkan struktur yang terlalu kaku dan dalam beberapa kasus, tidak memberikan simulasi deformasi yang diinginkan. Di lain pihak, pilihan tipe elemen pertama dinilai dapat menggambarkan deformasi yang lebih masuk akal, sehingga tipe ini digunakan dalam pemodelan.

Dies dimodelkan sebagai *rigid wall* yang didefinisikan dari geometri *surface* yang diberi karakteristik benda kaku dengan karakteristik tambahan koefisien gesek saat kontak dengan pipa. Koefisien gesek berdasarkan simulasi dan pengujian sebelumnya ditentukan sebesar 0,15 untuk kasus spesimen yang diberi pelumas gemuk (*grease*) [9].



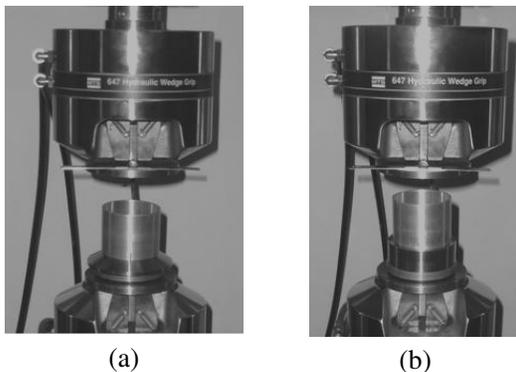
Gambar 2. Skema modul penyerap impact: a) *Internal inversion*, b) *Axial splitting*

Gambar skematik untuk *internal inversion* dan *controlled axial splitting* dapat dilihat pada Gambar 2. Untuk *internal inversion*, parameter dimensi utama yang dipantau meliputi: diameter luar, D_o , tebal pipa, t , dan radius dies, R_d . Besar energi impact dipantau dari tingginya respon gaya dan panjang deformasi yang terjadi. Sedangkan pada *axial splitting*, parameter yang dipantau adalah: diameter luar, D_o , tebal pipa, t , sudut dies, α , dan jumlah sobekan, N_c . Sudut dies ditetapkan sebesar, 45° , 60° dan 75° . Energi impact dimodelkan baik dengan me-variasikan besar massa dan/atau kecepatan impact.

4. PENGUJIAN

Tujuan pengujian adalah untuk membandingkan/mevalidasi hasil simulasi numerik dengan menggunakan software LS-Dyna untuk memperoleh pemahaman akan karakteristik modul penyerap impact mekanisme *internal inversion* dan *axial splitting*. Pengujian dilakukan dengan metode kuasi-statis dan *drop test*. Dengan metode kuasi statis, pemahaman mekanisme deformasi modul secara terinci dapat diperoleh, sedangkan *drop test*, adalah pengujian yang lebih mendekati kondisi nyata dalam kasus tabrakan.

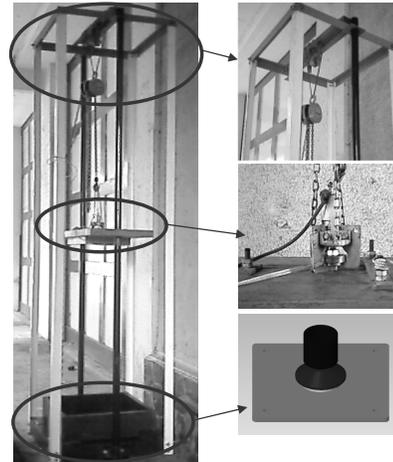
Pengujian kuasi-statis dilakukan dengan menekan modul dengan dua dies atas dan bawah pada kecepatan penekanan yang rendah, yaitu 0,5 mm/detik menggunakan mesin uji universal MTS (Gambar 3). Gaya reaksi dan perpindahan dimonitor dari sensor-sensor mesin uji dalam domain waktu dan disimpan dalam sistem akuisisi data secara digital.



Gambar 3. Pengujian kuasi-statis menggunakan mesin uji universal MTS pada: a) *Axial splitting*, b) *Internal inversion*

Drop test dilakukan pada test rig dengan beban penumbuk 100 kg, yang dilepas dari ketinggian tertentu untuk memperoleh energi impact yang bervariasi. Ketinggian maksimum yang dapat disediakan test rig dapat mencapai 2,5 m. Data yang dimonitor adalah percepatan impactor menggunakan akselerometer. Data analog dari akselerometer diolah dengan charge amplifier dan ADC sebelum ditransfer ke PC menggunakan software akuisisi data LabView, sebelum diolah dan disimpan sebagai data digital. Data percepatan setiap waktu tersebut, dengan masukan massa impactor dan dengan asumsi massa spesimen diabaikan, diperoleh

perkiraan gaya yang diterima oleh spesimen modul penyerap impact. Karena keterbatasan peralatan, deformasi spesimen selama mengalami impact tidak dimonitor. Sebagai gambaran, deformasi akhir diukur sebagai perbedaan antara panjang spesimen sebelum dan sesudah impact. *Drop test rig* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.



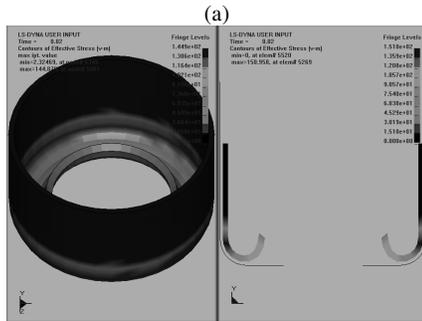
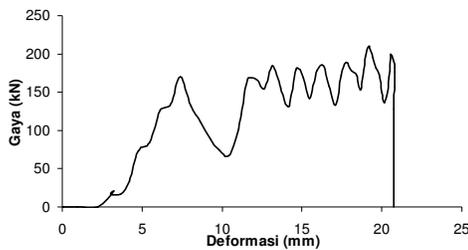
Gambar 4. Test rig untuk uji impact *drop test*

5. HASIL DAN DISKUSI

5.1 Karakteristik Modul

Karakteristik modul *internal inversion* dapat dipahami dari kelakuan kuasi statiknya yang terdiri dari tiga tahap [6]. Tahap pertama ditandai dengan peningkatan respon gaya akibat mulai terdeformasinya pipa mengikuti bentuk *dies*. Deformasi tersebut memerlukan penyerapan energi yang cukup besar sampai suatu titik kritis saat deformasi akibat bending longitudinal mencapai nilai maksimumnya. Hal ini diikuti oleh ketidakstabilan longitudinal yang berakibat menurunnya gaya tekan pipa. Tahap berikutnya pipa mengalami inversi, yaitu pembalikan ujung pipa ke atas yang memerlukan energi deformasi secara kontinu untuk regangan tekan sirkumferensial dan pelurusan bagian ujung pipa. Hal tersebut ditunjukkan dengan adanya peningkatan respon gaya. Kemudian tahap ketiga, yaitu pelurusan ditandai kondisi tunak (*steady-state*) pada respon gaya kuasi-statis (Gambar 5a).

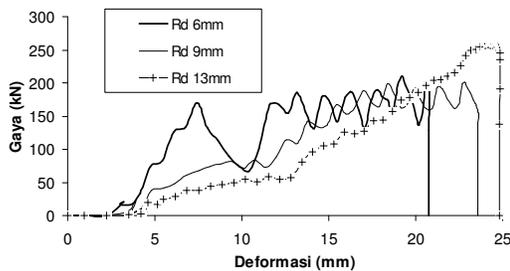
Pada simulasi impact, kondisi *steady* masih menampakkan fluktuasi. Hal ini diperkirakan akibat ketidaksempurnaan model elemen hingga, yaitu dalam penggunaan tipe elemen *Brick*. Dengan tipe tersebut deformasi terjadi seolah-olah terpecah-pecah yang ternyata berhubungan dengan jumlah elemen dalam arah aksial yang terlibat saat penekanan. Penggunaan tipe elemen kuadratik diperkirakan dapat memberikan simulasi deformasi yang lebih baik, namun sejauh ini tidak memberikan hasil yang lebih baik. Gaya rata-rata tahap tersebut menggambarkan gaya respon *steady-state*-nya.



Gambar 5. Hasil simulasi Internal inversion: a) Respon gaya-deformasi, b) deformasi. ($D_o=76,2$ mm, $t = 2$ mm, $R_d = 6$ mm)

Radius kelengkungan dies, relatif terhadap diameter luar pipa menentukan mekanisme deformasi pipa. Pada radius cukup kecil, mekanisme yang terjadi adalah *inversion* (Gambar 6). Sebaliknya jika radius kelengkungan melebihi nilai kritis, deformasi modul akan mengikuti mekanisme *inosing* dengan respon yang berbeda.

Parameter dimensi pipa diwakili oleh diameter luar, D_o , dan tebal, t yang dipantau dalam parameter non-dimensional, D_o/t . Selain itu, radius kelengkungan dies akan berpengaruh pada tingkat keberhasilan deformasi *internal inversion* seperti yang diinginkan sehingga memberikan karakteristik yang mendekati ideal. Pada observasi sebelumnya, diperoleh untuk diameter luar 76,2 mm, dan tebal 2 mm, radius kelengkungan dies yang memberikan karakteristik baik adalah $R_d = 6$ mm. Diperkirakan kelakukan ini juga berlaku untuk skala dimensi lain, sehingga ditetapkan bahwa rasio diameter luar terhadap radius kelengkungan dies, D_o/R_d , sebesar 12,7.

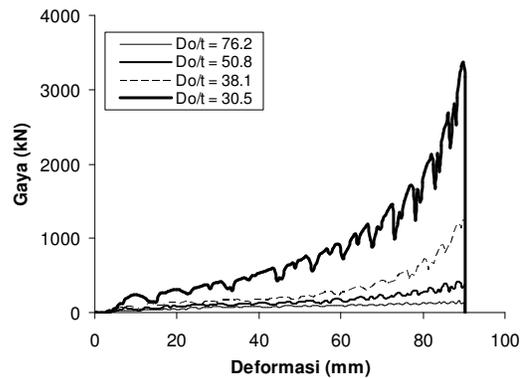


Gambar 6. Pengaruh radius kelengkungan dies terhadap respon Gaya-deformasi. ($D_o = 76,2$ mm, $t = 2$ mm)

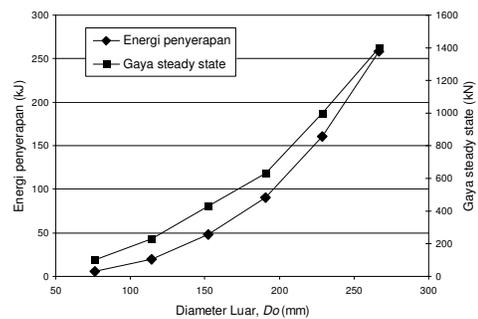
Pada evaluasi pengaruh dimensi pipa, diamati beberapa besaran rasio (Gambar 7). Simulasi pengaruh rasio D_o/t , menghasilkan karakteristik deformasi yang tidak lagi

inversion, melainkan seperti *inosing*. Hal ini karena variasi rasio dilakukan dengan mengubah tebal pipa yang ternyata memiliki efek yang cukup besar. Besaran yang mungkin lebih dominan di sini adalah rasio R_d/t , yang dapat menentukan jenis mekanisme deformasi, selain rasio D_o/R_d .

Gaya *steady state* untuk material aluminium dinilai cukup mewakili karena karakteristik yang ditampilkan setelah fasa terakhir adalah mendatar. Sedangkan besaran energi yang dapat diserap diperoleh dengan membatasi deformasi sampai hanya 0,9 dari panjang modul. Sebenarnya, panjang deformasi maksimum mempengaruhi besarnya energi yang dapat diserap secara proporsional, namun untuk simulasi distandarkan dengan simulasi menggunakan *stroke* maksimum tertentu yang mewakili deformasi efektif, jika perangkat modul dirancang secara baik. Hasil ini memberikan bekal utama dalam pemilihan dimensi modul untuk berbagai kasus tabrakan berdasarkan batas gaya maksimum dan besar energi impact yang akan diserap. Pengaruh skala dimensi terhadap respon gaya *steady* dan energi yang diserap modul dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 7. Pengaruh rasio diameter luar terhadap tebal, D_o/t , pada respon Gaya-deformasi. ($D_o = 76,2$ mm, $R_d = 6$ mm)



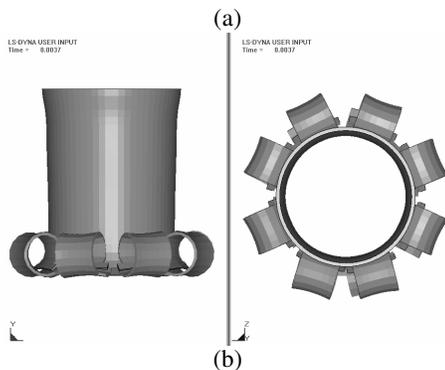
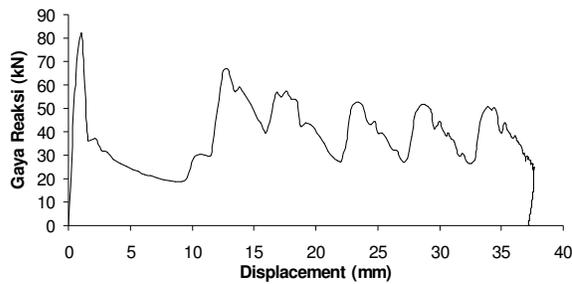
Gambar 8. Pengaruh dimensi modul *internal inversion* pada: a) Gaya *steady state*, b) Energi yang dapat diserap ($D_o/t = 38,1$, $D_o/R_d = 12,7$).

Karakteristik utama respon gaya terhadap deformasi mekanisme *axial splitting*, ditandai oleh naiknya gaya sesaat pada saat terjadi deformasi peningkatan regangan yang intensif pada ujung pipa sampai regangan maksimum tercapai dan mulai tersobek (Gambar 9a). Sobekan awal pada ujung pipa membantu mengarahkan

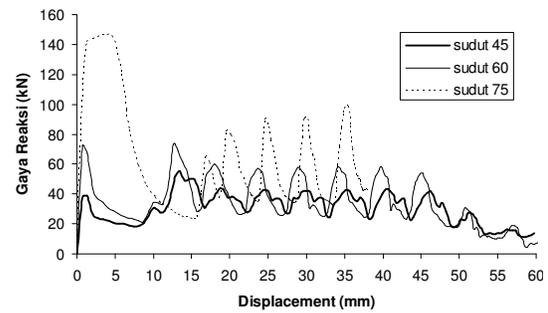
sobekan selanjutnya dan menghindari ketidakpastian dalam prediksi deformasi. Setelah tahap sobekan, respon gaya mengalami kondisi *steady* sampai energi impak terserap keseluruhan atau deformasi maksimum telah tercapai. Namun, dari respon gaya tidak didapati kondisi *steady*, melainkan respon fluktuatif sampai akhir deformasi. Dari hasil pengamatan animasi hasil simulasi deformasi, diketahui bahwa puncak-puncak gaya tersebut bersesuaian dengan kontak ujung-ujung elemen pada model elemen hingga pipa. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan tipe elemen *Brick* kurang baik memodelkan deformasi *axial splitting*, kelakuan yang sama dengan yang terjadi pada simulasi *internal inversion*.

Sudut kemiringan dies berpengaruh pada tingkat kesulitan pipa untuk berdeformasi. Semakin besar sudut dies, maka semakin sulit pipa berdeformasi yang ditunjukkan dengan semakin tingginya respon gaya (Gambar 10). Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa untuk *controlled axial splitting*, sudut dies 45° memberikan karakteristik yang lebih mendekati ideal, sehingga akan dipilih dalam aplikasi selanjutnya modul jenis ini.

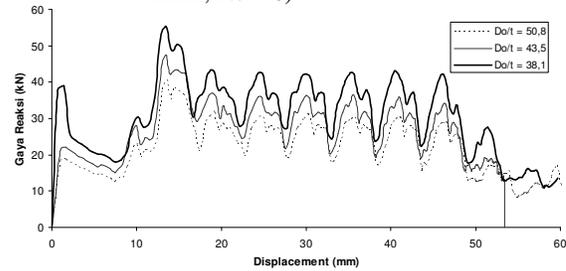
Untuk memperoleh konfigurasi dimensi modul yang memiliki karakteristik penyerapan yang optimum, maka diperlukan pengetahuan mengenai pengaruh dimensi pipa. Parameter dimensi pipa modul penyerap impak diwakili oleh rasio antara diameter luar dan tebal (D_o/t).



Gambar 9. Hasil simulasi Axial splitting: a) Respon gaya-deformasi, b) deformasi. ($D_o=76,2$ mm, $t = 2$ mm, $\alpha = 60^\circ$, $N_c = 8$)



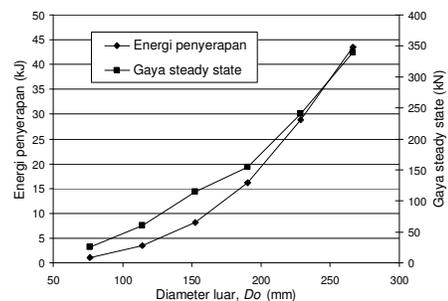
Gambar 10. Pengaruh sudut dies pada hubungan Gaya terhadap deformasi. ($D_o = 76,2$ mm, $t = 2$ mm, $N_c = 6$)



Gambar 11. Pengaruh dimensi (Diameter/tebal, D_o/t) pada hubungan Gaya-Deformasi ($N_c = 6$, $\alpha = 45^\circ$, $D_o = 76,2$ mm)

Untuk analisis ini, diameter luar ditetapkan sebesar 76,2 mm, sedangkan tebal sebesar 2 mm, 1,75 mm dan 1,5 mm. Dari Gambar 12 terlihat bahwa semakin tebal pipa menyebabkan gaya reaksi semakin besar, deformasi yang terjadi semakin kecil dan jari-jari kelengkungan (*curling*) semakin kecil.

Untuk mengetahui konsistensi karakteristik mekanisme modul pada berbagai ukuran/skala, maka simulasi juga dilakukan untuk rasio D_o/t tertentu dalam berbagai skala. Rasio D_o/t yang dipilih adalah 50,8. Hasil simulasi memberikan gambaran karakteristik yang cukup konsisten dari modul ini untuk parameter *crashworthiness* gaya *steady state* dan energi yang dapat diserap (Gambar 12). Data energi yang diserap, pada grafik diperoleh dengan panjang *stroke* yang proporsional dengan diameter luar ($L/D_o = 0,787$) dan deformasi maksimum diperkirakan sebesar $0,8 L$.



Gambar 12. Pengaruh ukuran modul *axial splitting* pada: a) Gaya *steady state*, b) Energi yang dapat diserap ($N_c = 8$, $\alpha = 60^\circ$).

Kelakuan modul mekanisme *axial splitting* dan *internal inversion* cukup baik untuk rentang skala dimensi 1 sampai 3,5 yang diwakili oleh parameter gaya reaksi *steady state* dan energi yang dapat diserap.

5.2 Pengujian & Perbandingan

Masing-masing tiga spesimen *axial splitting* dan *internal inversion* telah diuji kuasi-statik dengan ringkasan hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 2. Pada mekanisme internal inversion, pada umumnya gaya *steady state* telah tercapai. Namun, dengan panjang awal modul yang terbatas, porsi transien masih terlalu besar dibandingkan dengan porsi *steady state*, sehingga dinilai masih belum memberikan efek penyerapan energi deformasi yang optimum. Spesimen ketiga, dengan radius dies 15 mm, menghasilkan karakteristik respon gaya yang berbeda. Mekanisme deformasi yang terjadi pun berbeda, yaitu *nosing* bukan lagi *internal inversion*. Pada mekanisme *nosing*, respon gaya tidak mengalami *steady state* melainkan cenderung naik secara kontinu hingga pengujian dihentikan sebelum mencapai batas maksimum kapasitas mesin uji, yaitu 100 kN. Dengan tidak adanya gaya *steady state* pada mekanisme *nosing*, energi penyerapan tidak maksimal untuk panjang stroke yang sama. Dari hasil simulasi di atas (Gambar 6) dapat dilihat bahwa kasus modul pada dies akan menghasilkan mekanisme *nosing* bahkan pada radius dies yang lebih kecil, yaitu 13 mm. Maka antara pengujian simulasi saling menguatkan. Penelitian yang lebih detail perlu dilakukan untuk menentukan radius dies kritis yang memisahkan antara mekanisme *internal inversion* dan *nosing*. Parameter yang dapat digunakan adalah rasio antara tebal terhadap radius dies, maupun diameter terhadap radius dies.

Karakteristik kuasi-statik dari modul penyerap impact merupakan informasi penting untuk memahami perilaku modul pada pembebanan impact, yaitu dengan kecepatan pembebanan yang tinggi. Perbandingan antara respon kuasi-statik hasil pengujian dengan simulasi impact dari LS-Dyna dapat dilihat pada Gambar 13a. Simulasi impact dilakukan untuk kasus dengan massa penumbuk 100 kg, dari ketinggian 2,5 m. Dalam semua hasil simulasi impact, gaya respon lebih tinggi dibandingkan dengan kasus kuasi-statik. Hal ini disebabkan oleh efek inersia maupun peningkatan batas kekuatan luluh material pada

pembebanan kecepatan tinggi (*high strain rate*). Namun, diperkirakan prediksi LS-Dyna masih terlalu tinggi (*over estimate*), terutama dalam pemodelan menggunakan efek laju regangan model Cowper-Symonds. Seperti dibahas oleh Reid dan Harrigan [6], model Cowper-Symonds dinilai memberikan prediksi berlebih terhadap efek laju regangan tinggi untuk kasus regangan besar seperti kasus yang sedang dibahas ini. Diusulkan dalam pengkajian selanjutnya untuk mengganti model efek laju regangan atau menghilangkan sama sekali karena kecepatan impact kasus tabrakan kereta api belum termasuk kecepatan impact yang menimbulkan efek laju regangan.

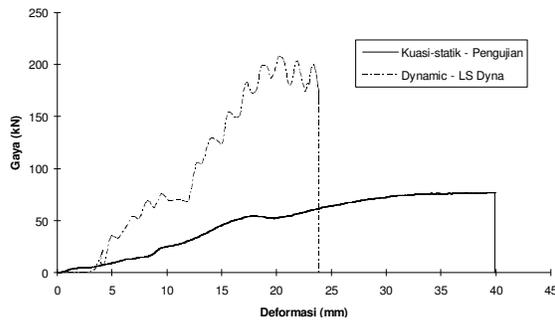
Sementara untuk modul dengan mekanisme *axial splitting*, gaya *steady state* tercatat lebih rendah dibandingkan dengan mekanisme *internal inversion*. Hal ini dapat dipahami dari mekanisme pembatas berupa sobekan aksial dari pipa, di samping pembalikan. Dengan rancangan sobekan awal, ketidakpastian akan mekanisme penyerapan dapat dikurangi, sobekan akan lebih terjamin dimulai dari sobekan awal tersebut, sekaligus menurunkan lonjakan gaya (*peak force*) untuk mengatasi beban untuk memulai sobekan saat deformasi pada modul tanpa sobekan awal. Namun, konsekuensi adanya sobekan awal tersebut adalah penurunan gaya respon *steady state* yang sekaligus energi penyerapan per satuan panjang modul.

Perbandingan antara karakteristik kuasi-statik dan simulasi impact menunjukkan kemiripan yang tinggi, seperti terlihat pada Gambar 13b. Fluktuasi pada simulasi lebih disebabkan oleh pemodelan elemen hingga dengan tipe elemen *brick*, sedangkan amplifikasi respon gaya *steady state* dinilai masih terlalu tinggi yang disebabkan prediksi berlebih pemodelan dengan menggunakan model material Cowper-Symonds.

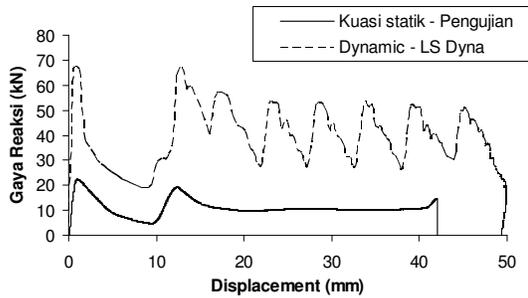
Sejauh ini *drop test* belum menunjukkan hasil yang dapat diterima, terutama dalam gaya respon maupun durasi impact yang terjadi. Hal ini mungkin disebabkan oleh ketidakakuratan data gaya yang diambil secara tidak langsung, yaitu dari akselerometer, dan keterbatasan sistem pencuplikan data. Pengembangan selanjutnya dalam penelitian ini akan menyangkut perbaikan sistem pencuplikan data di samping perbaikan *test rig*.

Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Uji Kuasi-Statik

| Spesimen | Internal Inversion | Axial Splitting | | $F_{steady\ state}$ (kN) | Keterangan |
|----------|--------------------|-----------------|-------|--------------------------|--|
| | R_d (mm) | α | N_c | | |
| 1 | 10 | | | 85,83 | Gaya masih mengalami peningkatan saat berhenti meskipun tidak signifikan |
| 2 | 10 | | | 75,82 | Pengujian diberhentikan karena deformasi sudah mendekati batas maksimum. Gaya steady state tercapai |
| 3 | 15 | | | - | Mekanisme <i>Nosing</i> terjadi, gaya maksimum tercatat 80,92 kN sebelum pengujian dihentikan |
| 4 | | 45° | 0 | - | Tanpa sobekan awal, deformasi tidak terkontrol dengan baik. Mode kegagalan sobek/pecah arah longitudinal, menghasilkan deformasi yang terbatas. |
| 5 | | 45° | 8 | 11,24 | Diawali dengan gaya pembalik dengan puncak yang lebih rendah daripada F_{ss} . Deformasi terjadi dengan jumlah sobekan bertambah dari 8 menjadi 11. |
| 6 | | 60° | 8 | 10,4 | Diawali dengan gaya pembalik dengan 2 puncak yang lebih tinggi daripada F_{ss} . Deformasi terjadi dengan jumlah sobekan bertambah dari 8 menjadi 13 |



(a)



(b)

Gambar 13. Perbandingan antara hasil pengujian kuasi-statik dan simulasi dampak LS-Dyna: a) *Internal inversion*, b) *axial splitting*

6. KESIMPULAN

Simulasi kasus dampak pada pipa memberikan gambaran pengaruh beberapa parameter utama dimensi maupun material pada karakteristik dampak dua mekanisme penyerapan energi dampak modul, yaitu *internal inversion* dan *controlled axial splitting*. Pengujian kuasi-statik memberikan gambaran mekanisme deformasi secara kuasi-statik sekaligus pembandingan pengaruh laju regangan pada kasus dampak. Perkiraan pengaruh laju regangan pada simulasi kasus dampak masih dinilai terlalu tinggi. Verifikasi dari *drop test* belum dapat dilakukan dari pengujian yang telah dilakukan, karena hasil dinilai masih belum konklusif. Perbaikan dan modifikasi pada *drop test rig* akan dilakukan untuk memodelkan kasus dampak secara eksperimental dengan lebih baik.

Dari simulasi diperoleh hubungan antara dimensi dengan gaya *steady state* maupun energi dampak yang dapat diserap oleh modul. Hal ini diperlukan dalam proses perancangan selanjutnya, yaitu dalam penentuan dimensi modul untuk bermacam aplikasi penyerapan dampak.

7. UNGKAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai dari "Hibah Penelitian Program Hibah Kompetisi (PHK) A3 Dept. Teknik Mesin" tahun 2005. Untuk itu, penulis menyampaikan terima kasih.

8. DAFTAR PUSTAKA

1. D. C Tyrell, K. Severson, dan B. Marquis, *Crashworthiness of passenger trains safety of high-speed ground transportation systems*, Federal Railroad Administration. U.S. Department of Transportation, Washington D.C., 1998.
2. N. Jones, dan T. Wierzbicki, (eds.), *Structural Crashworthiness*, Butterworths, London, 1983.
3. M. A Macaulay, *Introduction to impact engineering*, Chapman and Hall, New York, 1987.
4. W. Johnson, dan A. G Mamalis, *Crashworthiness of Vehicles*, Mechanical engineering Publications LTD, London, 1978.
5. W Goldsmith, *IMPACT-The theory physical behaviour of colliding solids*, Edward Arnold LTD, 1960.
6. S. R Reid, dan J. J Harrigan, "*Transient effect in the quasi-static and dynamic internal inversion and nosing of metal tubes*," Departemen of Mechanical Engineering, UMIST, Manchester, 1997.
7. X. Huang, G. Lu., dan T. X Yu., "*On the axial splitting and curling of circular metal tubes*," International Journal of Mechanical Sciences, 44.
8. J. Hallquist, *LS-Dyna Theoretical Manual*, Livermore Software Technology Corporation, 1998.
9. R. Setiawan, Investigation on Friction Effects in Nosing and Internal inversion of Metal Tubes, *MSc. Dissertation*, Department of Mechanical Engineering, UMIST, Manchester, 1999.