

PERMODELAN KEUPAYAAN TENAGA SERAPAN BAGI TIUB PELINDUNG
LAGA MENGGUNAKAN KAEDAH UNSUR TERHINGGA

Tesis Ini Bertujuan Untuk Memenuhi Syarat-Syarat Penganugerahan Sarjana
Kejuruteraan Mekanikal

Fakulti Kejuruteraan Mekanikal Dan Pembuatan
Universiti Tun Hussein Onn Malaysia

2016

*Dedikasi khas kepada ibu bapa saya yang dihormati Encik Ismail Bin Ibrahim dan
Pn. Halimah Binti Esa.*

PENGHARGAAN

Segala puji bagi Allah S.W.T kerana dengan limpah kurnia-Nya dapatlah saya menyiapkan tesis ini dengan sempurna. Saya ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan yang tulus ikhlas kepada Dr. Al Emran Ismail sebagai penyelia tesis ini. Beliau telah banyak membantu dan memberi bimbingan yang amat bernilai sepanjang proses penyiapan tesis ini. Selain itu, saya ingin turut merakamkan jutaan terima kasih kepada ibu dan bapa saya iaitu Halimah Binti Esa dan Ismail Bin Ibrahim dengan kesabaran dan sokongan yang telah diberikan. Akhir kata, saya berdoa kepada Allah S.W.T mudah-mudahan hasil kerja ini dapat menyumbangkan kebaikan kepada kita semua.

ABSTRAK

Kajian ini dijalankan untuk mengkaji prestasi penyerap tenaga dan kelakuan runtuh pada pelindung laga apabila berlaku perlanggaran. Pelindung laga dapat mengurangkan tahap kecederaan kepada pemandu dan penumpang kenderaan semasa berlaku kemalangan. Berdasarkan kepada kajian lepas, kebanyakan perbincangan dijalankan adalah dalam mampatan sepaksi. Namun, mampatan sipi kurang dibincangkan. Pada masa yang sama, kurang kajian pada tiub hibrid dalam struktur pelindung laga. Model simulasi tiub pelindung laga dibina dengan menggunakan unsur terhingga ANSYS/LS-DYNA dengan mampatan kuasi-statik. Tiub pelindung laga menggunakan keluli berketahanan tinggi sebagai lapisan dalam dan bahan komposit pada lapisan luar. Bahan komposit yang digunakan adalah e-kaca/epoksi dan karbon/epoksi. Perubahan mampatan nisbah sipi yang digunakan adalah 0.00, 0.25, 0.50 dan 0.75. Perubahan sudut susunan komposit yang terlibat adalah $[+30^\circ/-30^\circ/+30^\circ]$, $[+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$ dan $[+60^\circ/-60^\circ/+60^\circ]$ dengan ketebalan lapisan 0.5, 0.8 dan 1.0 mm. Manakala, perubahan nisbah elips yang digunakan pada tiub keluli adalah 0.5, 0.7, 1.0, 1.3 dan 1.5. Selain itu, jenis sentuhan algoritma yang digunakan adalah "*automatic surface to surface contact*", "*contact automatic single surface*", "*contact eroding single surface*" dan "*contact tiebreak surface to surface*" pada jasad tegar, tiub keluli dan lapisan komposit. Kesan perubahan ketebalan, jenis dan sudut susunan lapisan komposit terhadap prestasi tenaga serapan dan kelakuan runtuh beransur dipertimbangkan dalam kajian. Kajian ini menunjukkan tiub hibrid menghasilkan prestasi tenaga serapan yang lebih baik berbanding tiub keluli kosong. Selain itu, didapati jenis komposit karbon/epoksi menghasilkan keputusan yang lebih baik berbanding dengan komposit e-kaca/epoksi terhadap prestasi penyerapan tenaga.

ABSTRACT

This study is conducted to investigate the performance and behaviour of the progressive collapses of hybrid tubes under eccentric compressive loading. There are tremendous amount of studies conducted in an axial compression problems. However, a lack of works of eccentric compression are conducted in the crashworthiness study. At the same time, not much research conducted on the hybrid tubes. Numerical models are constructed using ANSYS / LS-DYNA finite element analysis. The tube is made of high strength steel and the composite material such as e-glass/epoxy and carbon/epoxy are used to wrap the tube. In order to investigate the effect of eccentric loading, different eccentric ratio are used 0.00, 0.25, 0.50 and 0.75. On the other hand, different fibre orientations are used, for example $[+30^\circ/-30^\circ/+30^\circ]$, $[+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$ and $[+60^\circ/-60^\circ/+60^\circ]$. Additionally, the effect of thickness of 0.5, 0.8 and 1.0 mm are also studied. Meanwhile, there are 5 elliptical ratios of 0.5, 0.7, 1.0, 1.3 and 1.5 are investigated. There are four contacts algorithm are used such as "automatic surface to surface contact", "automatic single contact surface", "eroding single contact surface" and "surface to surface contact breaker" are applied on rigid plate, steel tube and composite wrap respectively. In general, this study focuses on the effects of thicknesses and orientation of composite layers on the energy absorption performance and progressive collapses. This study also shows that the hybrid tubes produce energy absorption performance better than the steel tube alone. The orientation of composite wrapped of $[+30^\circ/-30^\circ/+30^\circ]$ produce energy absorption performance better than other type of orientations. However, increasing the eccentric ratios indicate low of energy absorption. In addition, the carbon/epoxy produces better results compared with e-glass/epoxy hybrid composite in term of in energy absorption performance.

ISI KANDUNGAN

	TAJUK	i
	PENGAKUAN	ii
	DEDIKASI	iii
	PENGHARGAAN	iv
	ABSTRAK	v
	ABSTRACT	vi
	ISI KANDUNGAN	vii
	SENARAI RAJAH	xi
	SENARAI JADUAL	xvi
BAB 1	Pengenalan	
	1.1 Pengenalan	1
	1.2 Latar belakang kajian	2
	1.3 Penyataan masalah	2
	1.4 Kepentingan kajian	3
	1.5 Objektif	4
	1.6 Skop kajian	4
	1.7 Signifikasi kajian	4
	1.8 Persembahan tesis	5
BAB 2	KAJIAN LITERATUR	
	2.1 Pendahuluan	6
	2.2 Kajian lepas	7
	2.3 Struktur pelindung laga	13
	2.4 Aplikasi tenaga serapan pada struktur atau	14

bahan	
2.4.1	Penggunaan tenaga serapan untuk peningkatan struktur pelindung laga 15
2.4.2	Keupayaan tenaga serapan pada struktur dinding nipis 16
2.5	Parameter pelindung laga 17
2.5.1	Daya maksimum dan purata 18
2.5.2	Nisbah daya runtuhan 18
2.5.3	Keupayaan tenaga serapan 18
2.5.4	Tenaga serapan per unit jisim 19
2.5.5	Tenaga serapan per unit panjang 19
2.6	Geometri penyerap tenaga 19
2.6.1	Tiub dinding nipis 20
2.7	Mod runtuhan 20
2.7.1	Perubahan mod runtuhan 21
2.7.2	Teori mod runtuhan cincin alexander 22
2.7.3	Mod runtuhan bukan simetri atau berlian 26
2.8	Kaedah analisis unsur terhingga 27
2.8.1	ANSYS/LS-DYNA 28

BAB 3

METODOLOGI

3.1	Pengenalan 29
3.2	Parameter kajian 29
3.3	Model bahan bagi pemodelan unsur terhingga 30
3.3.1	Bahan struktur asas pelindung laga 32
3.3.2	Bahan struktur jasad tegar 33
3.3.3	Bahan balutan tiub hibrid 34
3.4	Ujian mampatan berkeadaan kuasi-statik 34
3.5	Pengesahan simulasi model berangka 35
3.6	Simulasi berangka 36
3.6.1	Jenis unsur model simulasi berangka 37

3.6.2	Pemodelan unsur bahan	38
3.6.3	Jaringan unsur model simulasi	39
3.6.4	Sentuhan algoritma model simulasi	40
3.6.5	Syarat sempadan dan kekangan simulasi berangka	40
3.7	Dimensi model simulasi berangka	41
3.8	Perubahan ketebalan lapisan komposit pada tiub hibrid	42
3.9	Bebanan sipi	43
3.10	Perubahan model tiub elips	44
3.11	Sudut susunan lapisan komposit tiub hibrid	44
3.12	Pengelasan data simulasi berangka	45
3.13	Kod bahasa ANSYS/LS-DYNA	46

BAB 4

ANALISIS DAN PERBINCANGAN

4.1	Pengenalan	47
4.2	Pengesahan simulasi model unsur terhingga	47
4.2.1	Pengesahan simulasi model unsur terhingga tiub keluli kosong	48
4.2.2	Pengesahan simulasi model unsur terhingga tiub hibrid	50
4.3	Keputusan kajian simulasi	53
4.3.1	Analisis kesan perubahan mampatan nisbah sipi pada tiub keluli kosong	53
4.3.2	Analisis pada tiub keluli elips	57
4.3.3	Kesan perubahan bebanan sipi pada tiub elips	59
4.3.4	Analisis kesan sudut susunan lapisan komposit terhadap bebanan sipi pada tiub hibrid	63
4.3.5	Analisis kesan perubahan ketebalan komposit terhadap tiub hibrid dengan	66

	bebanan sipi	
4.3.6	Analisis kesan perubahan bahan komposit terhadap tiub hibrid dengan bebanan sipi	69
4.3.7	Kelakuan runtuh kesan bebanan sipi pada tiub keluli pelindung laga kosong	72
4.3.8	Kelakuan runtuh kesan perubahan nisbah elips pada tiub keluli kosong	76
4.3.9	Kelakuan runtuh kesan perubahan bahan komposit pada tiub hibrid	79
4.3.10	Ringkasan keputusan analisis simulasi	84

BAB 5

KESIMPULAN DAN CADANGAN

5.1	Pengenalan	85
5.2	Kesimpulan	85
5.3	Cadangan	87

RUJUKAN	88
----------------	----

LAMPIRAN	94
-----------------	----

BIODATA	105
----------------	-----

SENARAI RAJAH

2.1	Tindak balas daya-sesaran pada tiub aluminium kosong dan hibrid.	8
2.2	Model simulasi runtuh beransur tiub aluminium berisi polistrin, (a) simulasi kaedah SPH, (b) simulasi kaedah FEM/SPH.	10
2.3	Perubahan bentuk runtuh tiub aluminium berisi polistrin, (a) eksperimen, (b) FEM, (c) SPH, (d) GEM/SPH.	10
2.4	Model picu pemula pada permukaan atas tiub komposit.	11
2.5	Model simulasi berangka pada tiub aluminium dan keluli; (a) Gambaran keseluruhan model tiub, (b) Gambaran bahagian yang berlubang.	12
2.6	Contoh pelindung laga pada bahagian hadapan kereta.	14
2.7	Contoh struktur badan kenderaan..	16
2.8	Contoh graf daya-sesaran daripada keputusan pengesahan simulasi model unsur terhingga tiub hibrid kajian ini.	17
2.9	Contoh perbezaan mod runtuh pada tiub dinding nipis, (a) mod berliang, (b) mod <i>concertina</i> atau cincin.	20

2.10	Mod runtuh tiub silinder di bawah bebanan sepaksi, (a) mod cincin. (b) mod berlian. (c) mod campuran.	22
2.11	Pengkelasan mod runtuh tiub dinding nipis.	22
2.12	Teori model mudah untuk runtuh paksi simetri.	23
2.13	Teori model runtuh untuk mod bukan simetri.	27
2.14	Kawasan dan blok jejaring lapan nod	28
3.1	Carta alir kerja kajian.	31
3.2	Lekungan tegasan-terikan keluli berketahanan tinggi.	33
3.3	Contoh graf daya-sesaran daripada keputusan pengesahan simulasi model unsur sehingga tiub hibrid kajian ini.	36
3.4	Lakaran model tiub hibrid; (a) Keratan retas model tiub hibrid, (b) Lapisan yang terlibat dalam tiub hibrid.	38
3.5	Lakaran lapisan tiub hibrid.	38
3.6	Konfigurasi model simulasi tiub hibrid.	41
3.7	Dimensi model simulasi tiub pelindung laga.	42
3.8	Konfigurasi bebanan sipi pada tiub pelindung laga pada pandangan atas.	43
3.9	Perubahan model tiub elips, (a) Sebelum perubahan. (b) Selepas perubahan dengan nisbah elips.	44
3.10	Sudut susunan lapisan komposit pada $[+30^\circ/-30^\circ/+30^\circ]$.	45
3.11	Contoh graf daya-sesaran daripada keputusan pengesahan simulasi model unsur sehingga tiub hibrid kajian ini..	46
4.1	Pengesahan pada tiub pelindung laga keluli kosong terhadap lengkungan daya-serasan.	48

- 4.2 Pengesahan model simulasi unsur terhingga tiub keluli kosong kajian ini dengan kajian lepas oleh Huang *et al.* (2012). (a) Keadaan awalan model simulasi tiub pelindung laga keluli kosong. (b) Keadaan akhir model simulasi tiub pelindung laga keluli kosong. (c) Keadaan akhir dari pandangan atas model simulasi tiub pelindung laga keluli kosong.. 59
- 4.3 Lengkungan daya-sesaran tiub pelindung laga hibrid daripada kajian ini dan kajian lepas. 51
- 4.4 Pengesahan model simulasi unsur terhingga tiub pelindung laga hibrid e-kaca/poksi di antara kajian lepas dengan kajian ini. (a) Keadaan awal model simulasi pada pandangan hadapan. (b) Keadaan akhir model simulasi pada pandangan hadapan. (c) Keadaan akhir model simulasi pada pandangan atas. 52
- 4.5 Keputusan pada tiga perubahan kawasan bebanan pada tiub kosong. 54
- 4.6 Kesan perubahan nisbah sipi mampatan pada tiub keluli kosong; (a) Tenaga serapan, (b) Tenaga serapan tentu, (c) Kecekapan tenaga serapan. 56
- 4.7 Kesan perubahan nisbah elips pada pada tiub keluli kosong; (a) Tenaga serapan, (b) Tenaga serapan tentu, (c) Kecekapan tenaga serapan. 58
- 4.8 Kesan perubahan mampatan nisbah sipi pada tiub keluli elips; (a) Tenaga serapan, (b) Tenaga serapan tentu, (c) Kecekapan tenaga serapan. 61
- 4.9 Kesan mampatan nisbah sipi pada sudut susununan bahan komposit; (a) Tenaga serapan, (b) Tenaga serapan tentu, (c) Kecekapan tenaga serapan. 65

- 4.10 Kesan ketebalan lapisan bahan komposit dengan mampatan nisbah sipi pada tiub hibrid; (a) Tenaga serapan, (b) Tenaga serapan tentu, (c) Kecekapan tenaga serapan. 67
- 4.11 Kesan perubahan jenis bahan komposit dengan mampatan nisbah sipi pada tiub hibrid; (a) Tenaga serapan, (b) Tenaga serapan tentu, (c) Kecekapan tenaga serapan. 71
- 4.12 Konfigurasi mampatan nisbah sipi 0.50 pada tiub keluli kosong dengan lengkungan daya melawan sesaran. 73
- 4.13 Kelakuan perubahan bentuk model simulasi bagi tiub pelindung laga keluli kosong pada pandangan hadapan; (a) Nisbah sipi 0.00, (b) Nisbah sipi 0.25, (c) Nisbah sipi 0.5, (d) Nisbah sipi 0.75. 74
- 4.14 Kelakuan perubahan bentuk model simulasi bagi tiub pelindung laga keluli kosong pada pandangan atas; (a) Nisbah sipi 0.00, (b) Nisbah sipi 0.25, (c) Nisbah sipi 0.5, (d) Nisbah sipi 0.75. 75
- 4.15 Kelakuan perubahan bentuk model simulasi bagi tiub pelindung laga elips pada pandangan hadapan dengan mampatan nisbah sipi 0.00; (a) Nisbah elips 0.5, (b) Nisbah elips 0.7, (c) Nisbah elips 1.0, (d) Nisbah elips 1.3, (e) Nisbah elips 1.5. 77
- 4.16 Kelakuan perubahan bentuk model simulasi bagi tiub pelindung laga elips pada pandangan atas dengan mampatan nisbah sipi 0.00; (a) Nisbah elips 0.5, (b) Nisbah elips 0.7, (c) Nisbah elips 1.0, (d) Nisbah elips 1.3, (e) Nisbah elips 1.5. 78

- 4.17 Konfigurasi mampatan nisbah sipi 0.00 atau mampatan sepaksi pada tiub hibrid dengan lengkungan daya melawan sesaran. 79
- 4.18 Kelakuan perubahan bentuk model simulasi bagi tiub pelindung laga hibrid dengan mampatan nisbah sipi 0.00; (a) Tiub hibrid e-kaca/epoksi pada pandangan hadapan, (b) Tiub hibrid karbon/epoksi pada pandangan hadapan, (c) Tiub hibrid e-kaca/epoksi pada pandangan atas, (d) Tiub hibrid karbon/epoksi pada pandangan atas. 80
- 4.19 Kelakuan perubahan bentuk model simulasi bagi tiub pelindung laga hibrid dengan mampatan nisbah sipi 0.25; (a) Tiub hibrid e-kaca/epoksi pada pandangan hadapan, (b) Tiub hibrid karbon/epoksi pada pandangan hadapan, (c) Tiub hibrid e-kaca/epoksi pada pandangan atas, (d) Tiub hibrid karbon/epoksi pada pandangan atas. 81
- 4.20 Kelakuan perubahan bentuk model simulasi bagi tiub pelindung laga hibrid dengan mampatan nisbah sipi 0.5; (a) Tiub hibrid e-kaca/epoksi pada pandangan hadapan, (b) Tiub hibrid karbon/epoksi pada pandangan hadapan, (c) Tiub hibrid e-kaca/epoksi pada pandangan atas, (d) Tiub hibrid karbon/epoksi pada pandangan atas. 82
- 4.21 Kelakuan perubahan bentuk model simulasi bagi tiub pelindung laga hibrid dengan mampatan nisbah sipi 0.75; (a) Tiub hibrid e-kaca/epoksi pada pandangan hadapan, (b) Tiub hibrid karbon/epoksi pada pandangan hadapan, (c) Tiub hibrid e-kaca/epoksi pada pandangan atas, (d) Tiub hibrid karbon/epoksi pada pandangan atas. 83

SENARAI JADUAL

3.1	Ciri – ciri mekanikal bahan struktur asas tiub pelindung laga.	32
3.2	Ciri – ciri mekanikal jasad tegar.	33
3.3	Ciri-ciri mekanikal bahan komposit.	34
4.1	Perbezaan kajian ini dengan kajian lepas oleh Huang <i>et al.</i> (2012) pada tiub keluli kosong.	50
4.2	Kadar perbezaan pengesanan simulasi pada tiub hibrid.	51
4.3	Keputusan analisis simulasi berangka untuk tiub pelindung laga keluli kosong	55
4.4	Keputusan simulasi tiub keluli elips dengan mampatan sepaksi	59
4.5	Keputusan simulasi tiub keluli elips dengan perubahan mampatan nisbah sipi	62
4.6	Keputusan simulasi tiub keluli elips dengan perubahan nisbah elips	62
4.7	Keputusan simulasi tiub hibrid komposit e-kaca/epoksi berketebalan 0.8 mm kesan daripada perubahan sudut susunan komposit	64
4.8	Keputusan simulasi tiub hibrid komposit e-kaca/epoksi bersudut susunan $[+30^{\circ}/-30^{\circ}/+30^{\circ}]$ dengan perubahan ketebalan komposit.	68

- 4.9 Keputusan simulasi tiub hibrid berketebalan 0.8 mm dan bersudut susunan $[+30^\circ/-30^\circ/+30^\circ]$ dengan perubahan jenis komposit. 70
- 4.10 Ringkasan keputusan analisis simulasi tiub pelindung laga. 84
-
-
-

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan

Perkembangan terhadap kemajuan negara masa kini telah meningkatkan tahap keselesaan kepada rakyat seperti negara Malaysia. Kehidupan rakyat kini bertambah baik dengan mampu memenuhi keperluan harian dalam meneruskan kehidupan seperti mampu memiliki kereta. Bilangan kereta di atas jalan raya meningkat sepanjang tahun. Mengikut laporan daripada Jabatan Pengangkutan Malaysia mendapati kenderaan jenis motorkar atau kereta telah didaftarkan 583,060 ribu unit untuk tahun 2013 sahaja (Jabatan Pengangkutan Jalan, 2013). Penambahan bilangan kereta di atas jalan raya turut meningkatkan kadar kemalangan. Kesan daripada kemalangan turut mengakibatkan kecederaan atau pun kematian. Oleh itu, untuk mengurangkan perkara demikian, teknologi keselamatan pada kereta perlu dipertingkatkan. Teknologi keselamatan pada kereta adalah seperti pemasangan bag udara, sistem brek anti-kunci (ABS) dan sebagainya.

Peningkatan ciri-ciri keselamatan pada kereta turut melibatkan penambahbaikan pada kekuatan struktur badan kereta. Jaminan terhadap kekuatan struktur badan kereta adalah paling utama yang melibatkan keselamatan pengguna. Teknologi pada struktur badan kereta adalah termasuk pada bahagian pelindung laga. Pelindung laga adalah bahagian yang ditugaskan untuk menyerap tenaga hasil perlanggaran dan berada di bahagian paling hadapan pada struktur kereta. Pelindung laga melindungi struktur utama kereta daripada daya hentakkan semasa kemalangan. Jadi, ia perlu diperbuat daripada bahan yang bersifat mulur dan mengalami ubah bentuk plastik sebelum pelindung laga runtuh sepenuhnya. Struktur pelindung laga

bertindak menyerap tenaga hentaman terlebih dahulu sebelum dihantar ke struktur lain (Johnson *et al.*, 1978; Reid, 1993; Alghamdi, 2001).

Oleh yang demikian, kajian ini memfokuskan kepada bagaimana cara untuk meningkatkan keupayaan pelindung laga dalam penyerapan tenaga hasil daripada daya perlanggaran. Selain itu, jenis perlanggaran turut dipertimbangkan dengan memilih jenis perlanggaran sipi. Ini dapat menentukan kesan perlanggaran sipi terhadap prestasi penyerapan tenaga oleh pelindung laga.

1.2 Latar belakang kajian

Ramai penyelidik mula bertukar kaedah penyelidikan daripada eksperimen kepada simulasi komputer seperti kaedah analisis unsur terhingga (FEA). FEA adalah satu teknik penyelidikan yang meluas dan digunakan secara global dalam rekabentuk, analisis dan pengoptimuman kajian (Olabi *et al.*, 2007; Lanzi *et al.*, 2004; Fyllingen *et al.*, 2010). Pelindung laga bertindak sebagai alat penyerapan tenaga hentakan daripada kemalangan atau perlanggaran. Oleh itu, ia termasuk dalam salah satu struktur keselamatan pada kenderaan automotif. Isu keselamatan kenderaan seperti dalam *Federation International de l'Automobile* (2003) mempersoalkan mengenai keperluan keselamatan dalam sistem keselamatan yang digunakan oleh kenderaan perlumbaan. Termasuk tali pinggang keselamatan, penghalang keselamatan, pelindung laga dan sebagainya.

Selain itu, nisbah kekuatan/berat bahan pelindung laga menjadi keutamaan kajian. Pemilihan bahan komposit telah menjadi popular untuk menggantikan bahan lazim seperti logam lembut yang mana ia kuat dan ringan (Song *et al.*, 2000). Penggunaan bahan komposit amat meluas dalam industri seperti pembinaan, automotif, aeroangkasa dan sebagainya. Bahan komposit memiliki kekuatan dan ketahanan yang tinggi dalam jangka masa penggunaan yang panjang. Ketahanan bahan komposit dipertimbangkan terhadap kecekapan dalam menyerap tenaga semasa dikenakan bebanan kuasi-statik.

1.3 Penyataan masalah

Beberapa model telah dicadangkan untuk menganalisis ciri-ciri tenaga serapan pada struktur tiub pelindung laga. Analisis yang dijalankan menggunakan kaedah simulasi

model berangka dalam menentukan prestasi pelindung laga terhadap kesan perlanggaran atau kemalangan (Kindervater *et al.*, 2000; Beard *et al.*, 2002). Kesan tindakbalas perlanggaran menghasilkan pelbagai jenis tenaga yang wujud disebabkan oleh geseran, ricihan, bengkokkan, runtuhan, ubah bentuk plastik dan sebagainya (Han *et al.*, 2007). Oleh itu, dalam kajian ini mempertimbangkan kadar runtuhan tiub pelindung laga untuk menentukan prestasi tenaga serapan.

Peningkatan penggunaan kenderaan motokar ini juga telah memberi kesan terhadap keselamatan pengguna. Tahap keselamatan ini dipertimbangkan demi mengelakkan dan mengurangkan kehilangan nyawa jika berlaku kemalangan. Mengikut statistik jumlah kemalangan jalan raya untuk seluruh Malaysia dari tahun 2001 hingga 2010 adalah sebanyak 511,861 ribu kes bagi jenis kenderaan motokar (Kementerian Pengangkutan Malaysia, 2010). Terdapat beberapa jenis atau keadaan kemalangan kenderaan berlaku seperti perlanggaran arah hadapan, sisi, belakang dan lain-lain arah.

Manakala, statistik kemalangan kenderaan yang melibatkan kematian menunjukkan jenis perlanggaran dari arah hadapan 24%, sisi 16%, belakang 3% dan lain-lain 1% (Guoxing & Tongxi, 2003). Oleh yang demikian, kajian terhadap pelindung laga dipertimbangkan kerana ia adalah penting dalam sesebuah binaan kenderaan. Keupayaan pelindung laga terhadap tenaga serapan apabila berlaku perlanggaran dipertimbangkan. Ciri-ciri pelindung laga juga dipertimbangkan seperti bahan, bentuk dan arah perlanggaran. Oleh itu, kajian ini secara keseluruhannya dijalankan untuk menentukan masalah seperti berikut:

- a) Analisis terhadap jenis perlanggaran pada arah hadapan-sipi.
- b) Penggunaan bahan komposit untuk tiub pelindung laga hibrid.
- c) Jenis bahan, ketebalan lapisan dan sudut susunan komposit.
- d) Pelindung laga keluli kosong berbentuk bulat dan elips.

1.4 Kepentingan kajian

Kepentingan dalam menjalankan kajian ini adalah:

- a) Dapat menganalisis kekuatan dan keupayaan penyerapan tenaga apabila dikenakan daya mampatan atau hentaman pada struktur tiub pelindung laga hibrid.

- b) Aplikasi kaedah unsur terhingga dalam penyelesaian bagi menentukan kapasiti tenaga serapan yang terhasil.
- c) Dapat mengaplikasikan penggunaan perisian ANSYS/LS-DYNA sebagai satu alternatif kajian yang menggunakan kaedah simulasi berbanding dengan kaedah prototaip.
- d) Memberi sumber rujukan kepada kajian-kajian yang berkaitan dengan struktur ini di masa akan datang.
- e) Dapat mencadangkan reka bentuk pelindung laga yang lebih berkesan kepada pengguna.

1.5 Objektif

- a) Mengkaji keupayaan penyerapan tenaga pada struktur tiub pelindung laga.
- b) Menentukan kesan perbezaan susunan lapisan, ketebalan dan jenis bahan balutan komposit pada tiub hibrid terhadap keupayaan tenaga serapan.
- c) Menentukan gambaran kelakuan runtuh beransur tiub pelindung laga apabila dikenakan mampatan nisbah sipi.

1.6 Skop kajian

Skop kajian ini merangkumi beberapa perkara:

- a) Membina model simulasi berangka tiub pelindung laga.
- b) Menganalisa model simulasi berangka dengan keadaan mampatan kuasi-staik yang menggunakan perisian analisis unsur terhingga.
- c) Ujian runtuh atau mampatan dijalankan pada arah hadapan-sipi model pelindung laga.

1.7 Signifikasi kajian

Hasil daripada kajian ini menunjukkan tiub pelindung laga dapat menyerap tenaga kesan daripada mampatan sipi dengan baik. Ciri-ciri keupayaan serapan tenaga mampatan sipi dapat menentukan keberkesanan fungsi struktur pelindung laga

berkenaan. Seterusnya, ia dapat membantu dalam peningkatan tahap keselamatan dan teknologi pada struktur badan kereta.

1.8 Persembahan tesis

Tesis ini mengandungi lima bab utama iaitu pengenalan, kajian literatur, metodologi, analisis serta perbincangan dan yang terakhir adalah kesimpulan. Bab pengenalan membincangkan mengenai latar belakang kajian, objektif, skop dan sebagainya. Bagi bab kajian literatur adalah mengenai kajian lepas yang berkaitan dengan kajian ini. Manakala dalam bab metodologi membincangkan kaedah kajian yang dijalankan terhadap tiub pelindung laga. Bab analisis dan perbincangan adalah penerangan hasil kajian yang didapati daripada hasil simulasi tiub pelindung laga. Akhirnya bab kesimpulan adalah menghuraikan kesimpulan untuk keseluruhan kajian ini.

BAB 2

KAJIAN LITERATUR

2.1 Pendahuluan

Bab ini menerangkan mengenai kajian lepas yang telah dijalankan oleh penyelidik tentang pelindung laga dan ciri-ciri tenaga serapan. Kajian literatur dapat mengenalpasti masalah-masalah atau ruang-ruang yang boleh ditambahbaik mengenai pelindung laga. Ia termasuk mengenai jenis bahan, bentuk dan termasuk jenis bebanan yang dikenakan pada pelindung laga. Di samping itu, pengumpulan maklumat yang berkaitan dengan kajian, terutamanya berkaitan dengan analisis kaedah unsur terhingga. Ia seperti kerja simulasi yang menggunakan perisian unsur terhingga ABAQUS, LS-DYNA dan lain-lain.

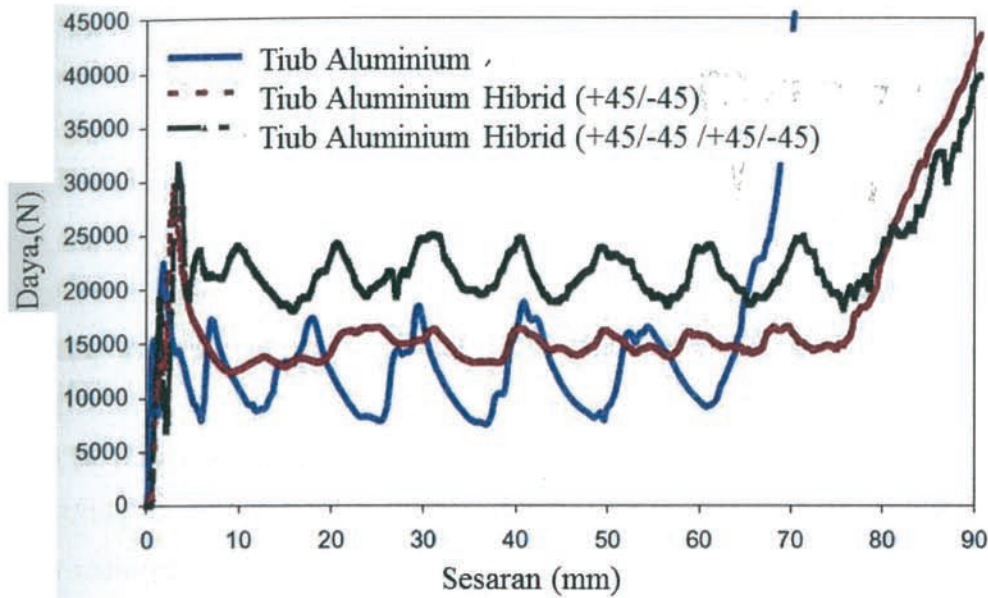
Selain itu, kajian literatur juga banyak membincangkan mengenai perubahan bentuk fizikal pelindung laga seperti bentuk silinder, segiempat dan sebagainya. Ia adalah untuk mendapatkan tahap optimum penyerapan tenaga impak. Jenis bahan utama yang digunakan dalam pembuatan pelindung laga turut dibincangkan seperti penggunaan keluli kepada aluminium yang lebih ringan. Namun, penggunaan bahan komposit juga disentuh dalam kajian pelindung laga. Demikian juga, perbincangan tentang teori-teori yang berkaitan dengan kajian turut dibincangkan.

Oleh itu, kajian pelindung laga ini menggunakan bentuk tiub silinder keluli berketahanan tinggi. Tiub tersebut juga dibalut dengan menggunakan bahan komposit daripada bahan e-kaca/epoksi dan karbon/epoksi. Ia turut dikenali sebagai tiub hibrid. Pelindung laga dimampatkan dengan perubahan peratusan bebanan sipi pada keadaan kuasi-statik. Analisis untuk menentukan prestasi penyerapan tenaga dijalankan menggunakan model simulasi berangka. Simulasi berangka dijalankan dalam perisian unsur terhingga ANSYS/LS-DYNA.

2.2 Kajian lepas

Analisis pada tiub pelindung laga telah banyak dibincangkan dalam kajian lepas. Banyak perbincangan mengenai pelindung laga dijalankan adalah untuk mencari kaedah atau teknologi baru dalam penyerapan tenaga daripada perlanggaran (Carney *et al.*, 1993). Parameter yang dipertimbangkan dalam perbincangan kajian lepas seperti pemilihan bahan, bentuk dan jenis tiub hibrid. Selain itu, penyelidik telah lama meneroka bagaimana untuk mereka struktur tiub pelindung laga dengan pengurangan penggunaan bahan atau kos yang lebih rendah. Dalam perspektif ini, bentuk struktur tiub lebih nipis dan lebih banyak penjimatan jisim. Namun produk yang terlampau nipis mengakibatkan lengkokan atau *buckling* berlaku. Maka, memerlukan penggunaan bahan komposit dalam struktur tiub (Rashedi *et al.*, 2015). Oleh yang demikian, kajian ini menetapkan ketebalan bahan keluli tiub pelindung laga adalah sama iaitu 1 mm.

Simulasi berangka yang dijalankan dalam kajian El-Hage *et al.*, (2006) adalah dalam keadaan mampatan kuasi-statik sepaksi. Ia adalah untuk menentukan prestasi tiub hibrid komposit/aluminium yang mengandungi balutan filamen yang diperkuatkan dengan e-kaca/epoksi. Komposit tersebut membalut keseluruhan tiub aluminium yang berbentuk empatsegi. Ia adalah untuk menentukan sudut susunan balutan komposit yang mempengaruhi peningkatan daya runtuh seperti dalam Rajah 2.1. Keputusan menunjukkan sudut susunan ($+40^{\circ}/-40^{\circ}/+40^{\circ}/-40^{\circ}$) adalah yang paling tinggi nilai daya. Ketebalan tiub aluminium dan komposit adalah berbeza setiap kajian. Perbezaan ketebalan tiub aluminium adalah 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 dan 2.0 mm. Manakala, perbezaan ketebalan komposit adalah 1.2 mm dan 1.9 mm untuk 1 dan 2 balutan. Keputusan kajian juga dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti ketebalan tiub aluminium dan sudut susunan komposit. Peningkatan ketebalan tiub aluminium meningkatkan lagi rintangan runtuh tiub. Ia mendapati tiub hibrid lebih baik berbanding tiub aluminium terhadap kapasiti tenaga serapan.



Rajah 2.1: Tindak balas daya-sesaran pada tiub aluminium kosong dan hibrid.

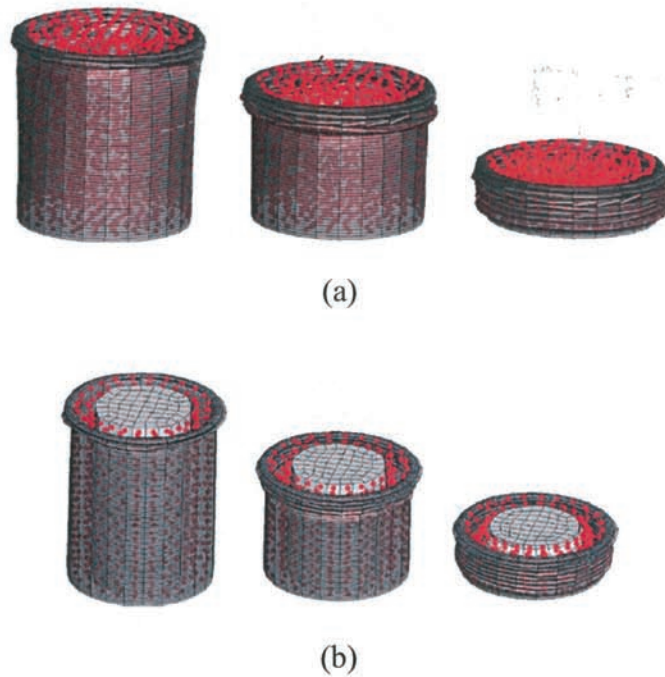
(El-Hage *et al.*, 2006)

Satu kajian berangka yang dilakukan oleh Han *et al.*, (2007) untuk menentukan tindakbalas dan kapasiti tenaga serapan terhadap tiub hibrid. Ia diperbuat secara *Pultruded* searah yang dibaluti dengan jalinan penguat gentian plastik (FRP) [$\pm 45^\circ$]. Tiub hibrid tersebut juga dibalut dengan dua balutan yang berbeza dengan sudut susunan komposit, ketebalan dan jenis bahan. Bahan balutan adalah gentian e-kaca atau karbon. Untuk sudut susunannya adalah $[0^\circ]$, $[90^\circ]$ dan $[\pm 45^\circ]$. Untuk ketebalan balutan adalah 0.3 mm atau 1.0 mm. Manakala tiub hibrid *Pultruded* berdiameter 40 mm dan berketebalan 3.174 mm. Dalam kajian ini menggunakan dua panjang tiub yang berbeza dengan panjang masing-masing 200 mm dan 400 mm. Kajian ini menggunakan simulasi unsur terhingga LS-DYNA dalam keadaan kuasi – statik dan dinamik.

Simulasi runtuh tiub hibrid yang dijalankan oleh Xiao *et al.*, (2009) adalah untuk menentukan kesan kerosakan terhadap komposit. Simulasi dijalankan dengan menggunakan hukum kerosakan *Material Models*, MAT58 dalam unsur terhingga LS-DYNA. Tindak balas simulasi MAT58 kajian ini dijalankan terhadap unsur tunggal atau terpilih sahaja. Kajian dijalankan untuk menentukan kekurangan model MAT58 berbanding dengan ujian eksperimen. Ia menggunakan tiub hibrid dengan bahan komposit karbon/epoksi. Bahan epoksi yang digunakan adalah daripada *Resin Vinyl Ester*. Simulasi runtuh tiub hibrid dijalankan dengan bebanan sepaksi adalah

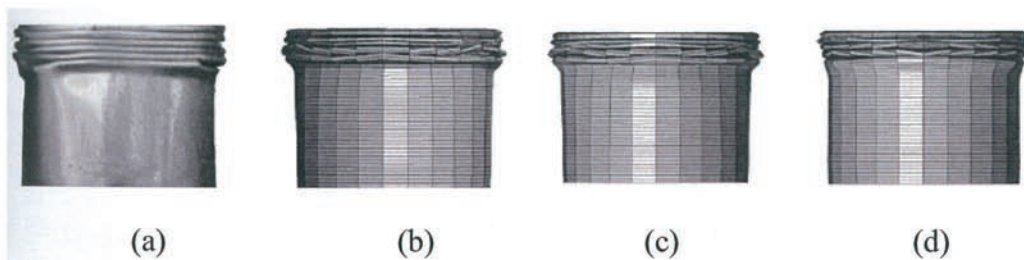
untuk membandingkan dengan keputusan eksperimen. Tiub hibrid yang mempunyai palam pemula menggunakan sudut susunan komposit adalah seperti $[0/\pm 30]$, $[0/\pm 45]^2$ dan $[0/\pm 60]^2$. Manakala, tiub hibrid tanpa palam pemula menggunakan sudut susunan komposit adalah seperti $[0/\pm 30]$, $[0/\pm 30]^2$ dan $[0/\pm 30]^4$. Hasil kajian ini didapati daya puncak untuk kedua-dua keadaan tersebut adalah dalam 20% perbezaan di antara simulasi MAT58 dan eksperimen. Manakala, tenaga serapan tentun pada tiub hibrid yang mempunyai palam pemula adalah 10 hingga 20% perbezaan simulasi MAT58 dan eksperimen. Tiub hibrid tanpa palam pemula adalah 30 hingga 40% perbezaan simulasi MAT58 dan eksperimen.

Aktay *et al.*, (2008) menjalankan simulasi model berangka (FEM) dalam keadaan mampatan kuasi-statik. Selain itu, ia turut menjalankan simulasi dengan menggunakan kaedah perataan zarah hidrodinamik (SPH) dan kaedah gabungan FEM/SPH. Kesemua simulasi dilakukan dengan bebanan sepaksi berkeadaan kuasi-statik pada tiub nipis aluminium yang berisi span polistirin. Rajah 2.2 menunjukkan simulasi yang dijalankan dengan menggunakan kaedah SPH dan FEM/SPH. Simulasi dijalankan dengan menggunakan perisian model kod unsur terhingga PAM-CRASH. Kaedah simulasi ini dijalankan adalah untuk dibandingkan dengan keputusan ujian eksperimen. Keputusan simulasi didapati menyerupai keputusan eksperimen seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.3. Perbezaan keputusan ketiga-tiga kaedah simulasi dengan eksperimen iaitu kaedah FEM, SPH dan FEM/SPH adalah masing-masing 2%, 3.9% dan 1.1% yang berpandukan kepada kapasiti tenaga serapan tentu.



Rajah 2.2: Perubahan runtuh beransur tiub aluminium berisi polistrin; (a) simulasi kaedah SPH, (b) simulasi kaedah FEM/SPH.

(Aktay *et al.*, 2008)

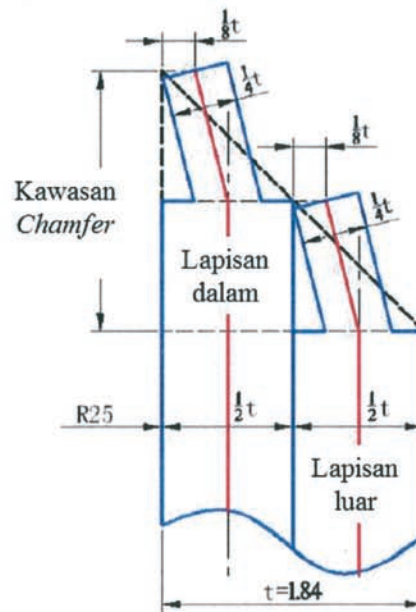


Rajah 2.3: Perubahan bentuk runtuh tiub aliminium berisi polistrin, (a) eksperimen, (b) FEM, (c) SPH, (d) GEM/SPH.

(Aktay *et al.*, 2008)

Kajian simulasi berangka dan eksperimen yang dijalankan oleh Huang dan Xinwei (2009) pada tiub komposit karbon/epoksi. Kedua-dua kajian dijalankan dengan bebanan kuasi-statik yang mana pada halaju malar eksperimen 2 mm/minti dan 100 mm/saat untuk simulasi. Simulasi yang digunakan dalam kajian ini adalah daripada unsur terhingga LS-DYNA. Kajian ini adalah untuk menentukan kapasiti tenaga serapan tentu dengan beberapa perubahan parameter pada model sampel.

Perubahan parameter model berlaku pada penggunaan picu pemula atau *chamfer* bersudut 45° pada tiub komposit seperti dalam Rajah 2.4. Ia adalah untuk menentukan kesan terhadap tenaga serapan tentu. Kajian yang dijalankan ini menunjukkan penggunaan picu pemula dapat mengawal arah runtuh tiub. Selain itu, ia mengurangkan daya awalan bebanan dan menstabilkan proses runtuh sepaksi.

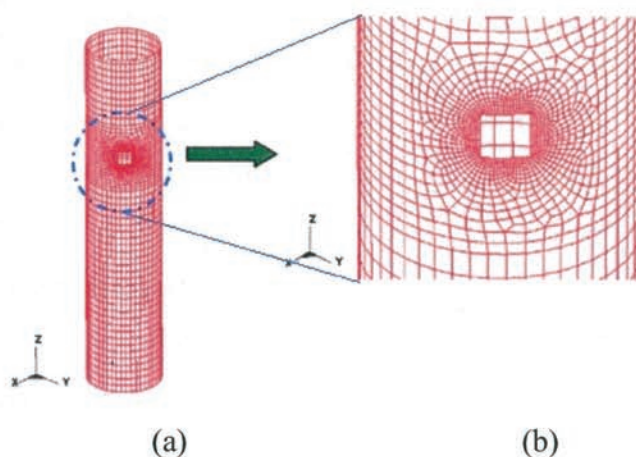


Rajah 2.4: Model picu pemula pada permukaan atas tiub komposit.

(Huang dan Xinwei 2009)

Kajian oleh Bisagni *et al.*, (2005) terhadap komponen struktur kenderaan Formula-1 untuk menentukan kesan perlanggaran dan keruntuhan terhadap tenaga serapan. Kajian ini juga menentukan ciri-ciri kegagalan struktur bahan dengan kesan terhadap tenaga serapan dan kecekapan tenaga serapan. Simulasi ini menggunakan model berangka unsur terhingga LS-DYNA dengan bebanan sepaksi dinamik. Dalam simulasi ini turut menggunakan picu pemula bersudut 45° pada permukaan atas tiub komposit. Dalam kajian ini menggunakan dua jenis siri lamina serat karbon yang berbeza iaitu, lamina fabrik dalam gentian karbon dan lamina ekaarah gentian karbon. Keputusan mendapati perbezaan simulasi dengan eksperimen hanya dalam lingkungan 20% untuk kadar daya maksimum runtuh dan 10% untuk tenaga serapan tentu.

Penentuan terhadap kelakuan keruntuhan tiub aluminium dan keluli yang dijalankan Han *et al.*,(2007) dengan menggunakan beban sepaksi kuasi-statik dan dinamik. Satu bahagian berlubang dibina dalam model dengan keluasan dan lokasi yang ditetapkan seperti dalam Rajah 2.5. Model simulasi dibina dengan menggunakan unsur terhingga LS-DYNA. Pembinaan lubang pada model simulasi adalah untuk menentukan kesan terhadap keupayaan tenaga serapan. Parameter simulasi berlangsung pada perubahan jenis bahan, lokasi bahagian buangan atau lubang, panjang tiub dan kelajuan perlanggaran atau bebanan sepaksi. Keluasan bahagian yang dibuang adalah 7.5×7.5 mm. Selain itu, terdapat perubahan kedudukan lubang pada tiub iaitu dengan nisbah 0.5, 0.75 dan 0.95 daripada keseluruhan panjang tiub. Kajian kuasi-statik mendapati kecekapan tenaga serapan untuk tiub aluminium dan keluli meningkat dengan perubahan kedudukan lubang daripada bahagian tengah tiub kepada bahagian atas tiub. Selain itu, apabila pembinaan lubang pada bahagian tengah tiub, berlaku lengkokan apabila dikenakan bebanan sepaksi. Manakala, pembinaan lubang pada bahagian atas tiub, berlaku runtuh beransur.



Rajah 2.5: Model simulasi berangka pada tiub aluminium dan keluli; (a) Gambaran keseluruhan model tiub, (b) Gambaran bahagian yang berlubang.

(Han *et al.*, 2007)

Kajian unsur terhingga menggunakan program LS-DYNA yang dibina oleh Huang *et al.*, (2012) adalah menentukan tindak balas dan kapasiti tenaga serapan pada tiub silinder hibrid. Ia dijalankan dengan bebanan kuasi-statik dan dinamik

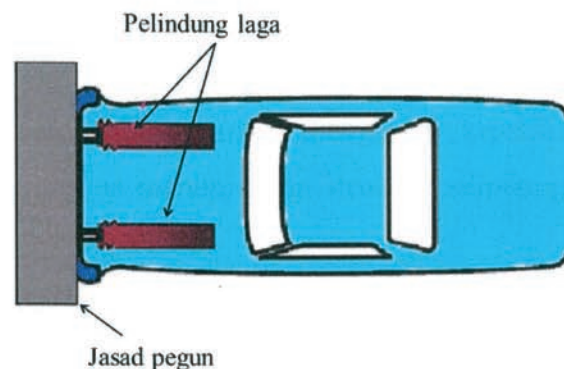
sepaksi. Kesan ketebalan dinding komposit, jenis bebanan dan sudut susunan komposit diuji. Sudut susunan balutan komposit adalah $[+/- 0^{\circ}]$, $[+/- 15^{\circ}]$, $[+/- 30^{\circ}]$, $[+/- 45^{\circ}]$, $[+/- 60^{\circ}]$, $[+/- 75^{\circ}]$ dan $[+/- 90^{\circ}]$ yang mana masing-masing mempunyai 3 lapisan komposit. Sudut susunan komposit memberi kesan kepada kapasiti tenaga serapan dan mod kegagalan tiub keluli. Selain itu, ciri-ciri bahan komposit adalah penting dalam menentukan kecekapan tenaga serapan. Keputusan simulasi mendapati kesan balutan bahan komposit pada tiub keluli meningkatkan kapasiti tenaga serapan dalam tiub.

Rumusan yang diperolehi daripada kajian lepas mendapati banyak perbincangan yang menggunakan mampatan atau bebanan sepaksi terhadap tiub bulat sahaja dan tiub elips perlu diperbincangkan dalam kajian ini. Oleh yang demikian, kajian ini menjalankan kajian pada mampatan atau bebanan sipi pada tiub atau sampel. Selain itu, penggunaan tiub hibrid masih kurang dibincangkan dalam kajian lepas. Seterusnya kajian terhadap tiub hibrid turut dijalankan dalam kajian simulasi ini dengan menggunakan bahan komposit e-kaca/epoksi dan karbon/epoksi. Perubahan ketebalan bahan komposit turut dibincangkan dalam kajian ini dengan memalarkan atau menetapkan ketebalan tiub keluli pada 1 mm. Bagi perubahan sudut susunan balutan komposit mendapati banyak dan pelbagai kaedah balutan komposit yang telah digunakan dalam kajian lepas. Namun, dalam kajian simulasi ini memilih untuk menetapkan tiga lapisan balutan sahaja untuk setiap sampel tiub hibrid. Jenis sudut susunan bahan komposit dalam simulasi ini adalah $[+30^{\circ}/-30^{\circ}/+30^{\circ}]$, $[+45^{\circ}/-45^{\circ}/+45^{\circ}]$ dan $[+60^{\circ}/-60^{\circ}/+60^{\circ}]$.

2.3 Struktur pelindung laga

Daripada pandangan kejuruteraan, pelindung laga adalah satu struktur yang bertindak menyerap tenaga hentakan kesan daripada perlanggaran dengan objek lain. Tindak balas terhadap penyerapan tenaga menjadi fungsi utama untuk pelindung laga. Pelindung laga menjadi salah satu struktur penting dalam pembuatan kereta. Dalam sistem keselamatan kereta yang melibatkan struktur, pelindung laga adalah struktur yang berada di hadapan seperti dalam Rajah 2.6. Pelindung laga dipertimbangkan untuk mengawal atau mengurangkan kesan keruntuhan atau kemusnahan struktur apabila perlanggaran berlaku.

Kebolehan struktur pelindung laga kenderaan menyerap tenaga perlanggaran dapat mengurangkan kesan kecederaan kepada pengguna. Pelbagai bentuk dan bahan yang digunakan dalam pembuatan pelindung laga seperti logam aloi berketahanan tinggi (Langseth *et al.*, 1999). Kualiti pelindung laga pada sesebuah kenderaan dapat diuji apabila didedahkan dengan bebanan mampatan atau hentakan. Kekurangan tahap kerosakan atau kecederaan pada kenderaan dan pengguna dapat dilihat selepas perlanggaran. Pelindung laga yang berkesan menunjukkan prestasi tenaga serapan yang tinggi (Guoxing dan Tongxi, 2003). Keupayaan penyerapan tenaga perlanggaran adalah satu parameter yang penting dalam membina sistem keselamatan yang pasif seperti pelindung laga adalah sesuai bagi melindungi pengguna apabila berlaku kemalangan (Mamalis *et al.*, 2001).



Rajah 2.6: Pelindung laga pada bahagian hadapan kereta.

(Tarlochan *et al.*, 2013)

2.4 Aplikasi tenaga serapan pada struktur atau bahan

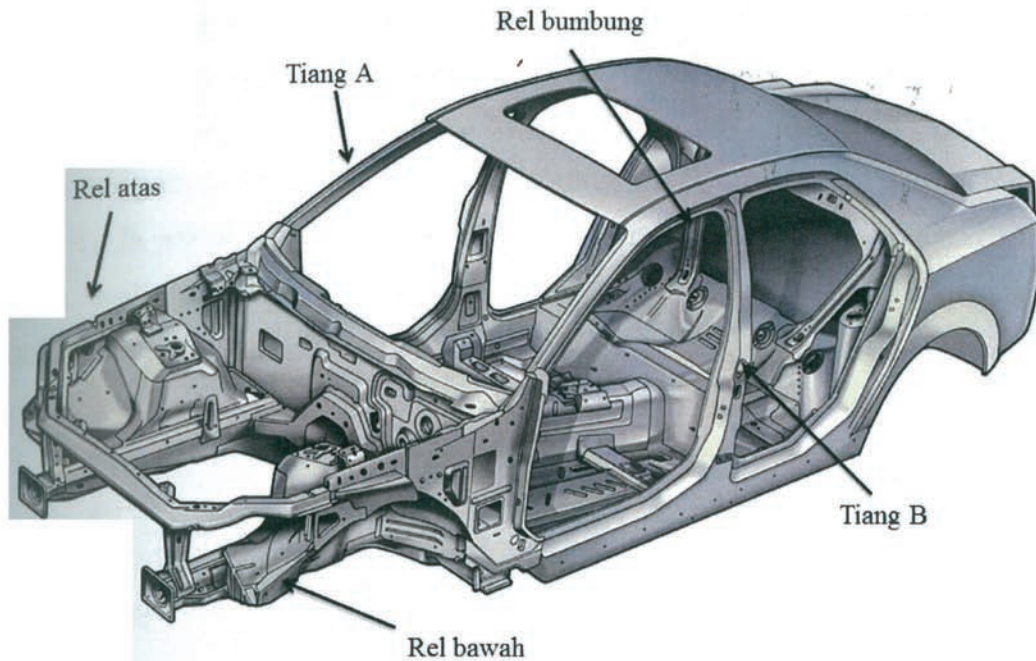
Kajian dan pembangunan tentang tenaga serapan terhadap struktur dan bahan sentiasa bertambah maju dengan pelbagai teknologi baru seperti penggunaan bahan komposit. Perkembangan ini adalah memfokuskan dalam mengurangkan atau menghilangkan tenaga kinetik semasa perlanggaran berlaku. Tenaga kinetik adalah tenaga yang disebabkan oleh gerakan daripada kesan tindak balas luar seperti perlanggaran. Kaitan kesan perlanggaran terhadap tenaga kinetik adalah hubungan tenaga kinetik awal dan akhir (Shermer, 2012). Oleh itu, tenaga kinetik yang wujud daripada perlanggaran akan dipindahkan melalui perubahan bentuk plastik.

Perubahan bentuk berkenaan adalah proses tenaga serapan. Ketinggian kapasiti tenaga serapan adalah menentukan keberkesanan pelindung laga sebagai alat penyerap tenaga (Tang *et al.*, 2013). Walaubagaimanapun, perkara ini telah diterima sejak tahun 1970, terutamanya untuk industri automotif dan pertahanan (Guoxing *et al.*, 2003).

2.4.1 Penggunaan tenaga serapan untuk peningkatan struktur pelindung laga

Peningkatan jumlah penduduk waktu ini, telah meningkatkan kepergantungan kepada sistem pengangkutan. Ini dengan jelas dengan menunjukkan peningkatan bilangan kenderaan di atas jalan raya. Peningkatan bilangan kenderaan ini telah meningkatkan kadar kemalangan. Oleh itu, permintaan terhadap sistem keselamatan yang lebih baik meningkat. Demikian, penyelidikan dalam mereka penyerap tenaga yang terbaik diteruskan. Ia adalah untuk melenyapkan tenaga hentakan semasa kemalangan berlaku di mana dapat melindungi pengguna atau pemandu kenderaan. Di mana, keadaan kereta yang kurang mengalami kerosakkan serta kecederaan pengguna adalah minima, ia menunjukkan struktur pelindung laga dapat berfungsi dengan baik (Guoxing *et al.*, 2003).

Rajah 2.7 menunjukkan beberapa istilah yang biasa digunakan pada struktur badan kenderaan jenis motorkar. Kebanyakan bingkai badan kenderaan adalah daripada ruangan atau kolum besi berdinging nipis. Bahagian atas dan bawah rel di bahagian depan badan kenderaan adalah bahagian yang paling terdedah dengan tenaga serapan. Manakala, tiang A, B dan rel bumbung direka untuk mengekalkan kekuatan dan kestabilan struktur kenderaan semasa berlaku pelanggaran atau kemalangan (Guoxing *et al.*, 2003)



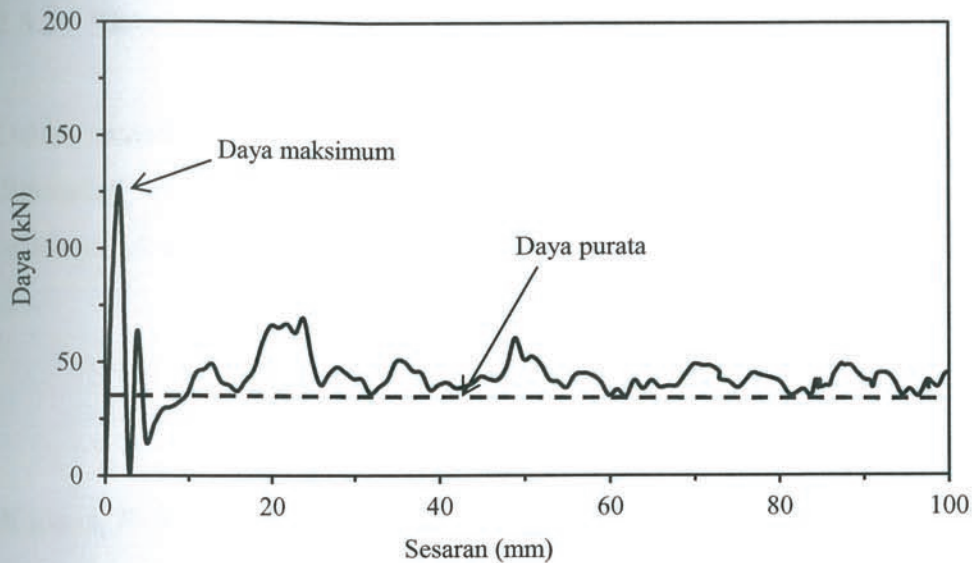
Rajah 2.7: Struktur badan kenderaan.
(Zhou, 2001)

2.4.2 Keupayaan tenaga serapan pada struktur dinding nipis

Kebanyakan kajian terhadap keupayaan tenaga serapan pada komponen bahan komposit menggunakan ujian runtuh sepaksi. Ini kerana ujian runtuh sepaksi adalah teknik yang terbaik dalam menentukan ciri-ciri tenaga serapan. Walaubagaimanapun, berlaku kegagalan pada runtuh dinding nipis disebabkan berlakunya lengkokan. Oleh itu, kefahaman tentang kelakuan runtuh lengkok adalah diperlukan dan penting. Selain itu, menurut Johnson dan Reid (Guoxing *et al.*, 2003) tenaga serapan adalah penukaran tenaga kinetik kepada perubahan bentuk plastik yang dipengaruhi oleh magnitud, kaedah bebanan, kadar penghantaran, corak perubahan bentuk atau anjakan dan sifat bahan. Perubahan bentuk plastik oleh penyerapan tenaga mampatan adalah perubahan mod runtuh seperti mod simetri sepaksi dan mod berlian iaitu bukan sepaksi.

Runtuh dinding nipis dengan keadaan kuasi-statik dapat dilakukan dengan halaju pemampat yang rendah dan malar. Namun, ujian dinamik boleh dijalankan dengan ujian jatuhkan pemampat pada tiub dinding nipis. Dalam ujian bebanan sepaksi, tenaga serapan oleh runtuh spesimen semasa proses runtuh dapat ditentukan daripada luas di bawah graf daya-sesaran seperti dalam Rajah 2.8. Pada

awalan bebanan mampatan, dinding nipis bersifat elastik dan daya meningkat dengan kadar mantap sehingga capai daya maksimum, P_{σ} . Ciri utama dalam lengkungan daya-sesaran adalah kawasan pasca-runtuhan iaitu daya purata, P_m . Keupayaan tenaga serapan daripada bebanan sepaksi turut dapat menentukan tenaga serapan tentu, E_s . Ia adalah nisbah tenaga serapan, E per unit jisim, m spesimen. Jisim, m adalah hasil darab isipadu, V dengan ketumpatan, ρ bahan spesimen (Guoxing dan Tongxi, 2003).



Rajah 2.8: Daya-sesaran daripada keputusan pengesahan simulasi model unsur terhingga tiub hibrid kajian ini.

2.5 Parameter pelindung laga

Parameter pelindung laga yang terhasil daripada ujian simulasi adalah seperti, daya puncak atau maksimum, daya purata, tenaga serapan, tenaga serapan tentu dan kecekapan tenaga serapan. Kesemua parameter yang terlibat adalah hasil daripada lengkungan daya-sesaran. Selain itu, nisbah daya runtuh, LR dan jumlah kerja yang dilakukan (W_i) turut diperolehi dalam lengkungan daya-sesaran.

2.5.1 Daya maksimum dan Purata

Komponen daya maksimum adalah daya yang tertinggi yang diperlukan dalam mengubah bentuk tiub. Ia terhasil daripada daya awalan kesan perlanggaran pelindung laga secara terus. Manakala, daya purata adalah untuk runtuh berterusan pada pelindung laga. Ketebalan tiub turut mempengaruhi daya purata (Al-Qrimli *et al.*, 2010).

2.5.2 Nisbah daya runtuh

Dalam menentukan mod kegagalan pada runtuh tiub dinding nipis, nisbah bebanan digunakan untuk menentukan ciri-ciri tenaga serapan pada spesimen. Nisbah bebanan, LR ditakrifkan sebagai:

$$LR = \frac{P_{\sigma}}{P_m} \quad (2.1)$$

di mana, P_{σ} adalah daya runtuh maksimum atau daya puncak dan P_m adalah daya purata bagi runtuh dinding nipis. Nisbah ini berkait rapat dengan mekanisme peningkatan dan pengurangan daya runtuh terhadap keupayaan tenaga serapan.

2.5.3 Keupayaan tenaga serapan

Keupayaan tenaga serapan boleh ditentukan daripada lengkungan daya-sesaran. Tenaga serapan, E dikira dengan dengan menentukan luas di bawah lengkungan daya-sesaran seperti persamaan di bawah:

$$E = \int_0^s P ds \quad (2.2)$$

di mana, P adalah daya purata dan ds merupakan jarak penghancuran yang berlaku.

2.5.4 Tenaga serapan per unit jisim

Tenaga serapan per unit jisim dikenali sebagai penyerapan tenaga tentu, E_s . Unit SI untuk tenaga serapan tentu adalah kJ/kg. Di mana, tenaga serapan tentu ditakrifkan sebagai:

$$E_s = \frac{E}{m} \quad (2.3)$$

di mana, E adalah tenaga serapan dan m adalah jisim tiub yang mana hasil darab isipadu, V dengan ketumpatan, ρ bahan. Nilai tenaga serapan yang paling tinggi menunjukkan pelindung laga yang ringan (Ahmad, Z. dan Thambiratnam, 2009). Oleh itu, penggunaan tiub dalam pembuatan pelindung laga adalah konsep penyerapan tenaga yang lebih cekap (Deshpande, 2005).

2.5.5 Tenaga serapan per unit panjang

Bagi tenaga serapan per unit panjang ditakrifkan sebagai:

$$E_L = \frac{E}{L} \quad (2.4)$$

di mana, E adalah tenaga serapan dan L adalah panjang runtuhan pada spesimen. Pengukuran struktur pelindung laga di mana panjang runtuhan telah dihadkan dan dikenali zon remuk, E_L (Sheshadri, 2006).

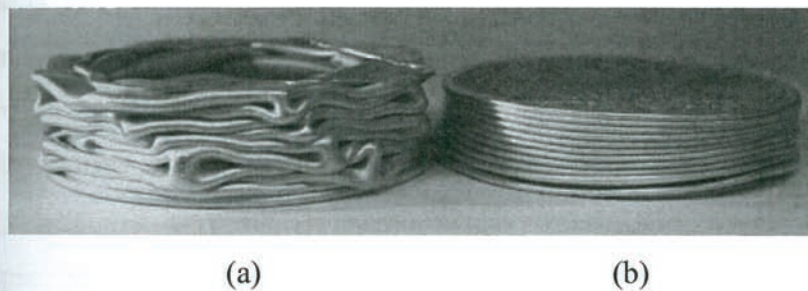
2.6 Geometri penyerap tenaga

Antara bentuk penyerap tenaga adalah tiub bulat, tiub persegi, tiub pelbagai sudut, *frusta* dan *honey comb cell*. Kesan geometri spesimen terhadap keupayaan tenaga serapan telah dikaji dengan beberapa perubahan seperti tebal dinding, panjang, diameter, bilangan lilitan dan sudut susunan. Selain itu, bentuk dan sudut pemacu turut menentukan keupayaan tenaga serapan (Huang Jiancheng dan Xinwei Wang, 2009).

2.6.1 Tiub dinding nipis

Tiub selider adalah struktur berongga yang mempunyai ketebalan dinding yang nipis. Tiub ini diperbuat dengan menggunakan kaedah proses penyemperitan yang panjang. Tiub dinding adalah struktur yang cekap dalam menentukan keupayaan tenaga serapan pelindung laga. Ia turut bersifat ringan dan ubah bentuk plastik yang baik apabila dikenakan bebanan sepaksi (Guoxing *et al.*, 2003). Selain itu, tiub dinding nipis mempunyai beberapa bentuk seperti silinder bulat dan persegi.

Bebanan sepaksi dikenakan pada tiub silinder dinding nipis menghasilkan beberapa mod runtuhan iaitu mod *concertina* atau cincin dan mod berlian seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.9 (Yamada *et al.*, 2005). Kelakuan runtuhan tiub dengan mod berlian adalah ubah bentuk tidak simetri. Manakala, mod *concertina* adalah ubah bentuk simetri.



Rajah 2.9: Perbezaan mod runtuhan pada tiub dinding nipis, (a) mod berlian, (b) mod *concertina* atau cincin.

(Yamada *et al.*, 2005)

2.7 Mod runtuhan

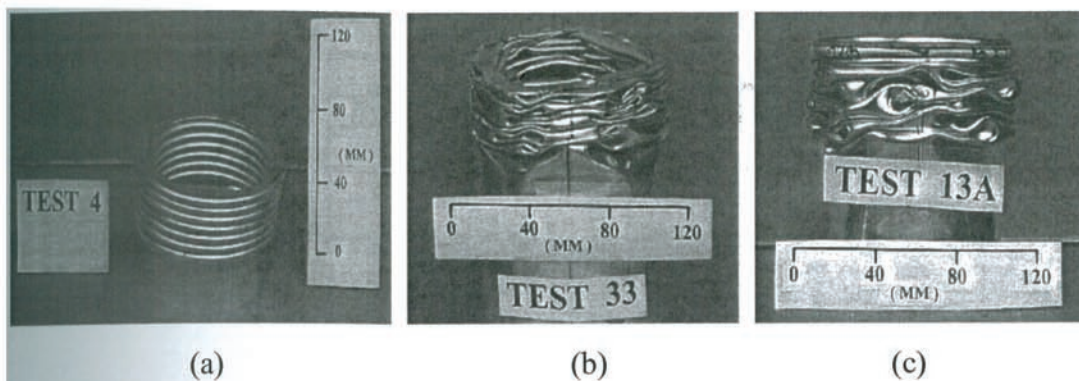
Runtuhan tiub dinding nipis berlaku disebabkan oleh tindakan daya luar seperti pelanggaran yang menghasilkan tenaga kinetik. Oleh itu, perubahan bentuk plastik pada tiub dinding nipis berlaku seperti runtuhan beransur adalah untuk menyerap tenaga kinetik. Dalam menentukan kecekapan tenaga serapan, bebanan sepaksi digunakan kerana ia adalah bebanan simetri (Guoxing *et al.*, 2003). Menurut Mamalis *et al.* (1989) sifat keanjalan pada ubah bentuk tiub dinding nipis semasa proses runtuhan kuasi-statik berlaku adalah tidak mempengaruhi keputusan. Ini

kerana ubah bentuk plastik pada mod runtuh adalah besar. Oleh itu, kesan keanjalan terhadap tiub diabaikan dalam menentukan keupayaan tenaga serapan. Selain itu, peralihan tenaga terhadap proses runtuh sepaksi pada mod *Euler* kepada mod lengkokan beransur dengan keadaan bebanan kuasi-statik dan dinamik telah diterangkan oleh Abramowicz dan Jones (Guoxing *et al.*, 2003). Ia didapati perubahan mod *Euler* kepada mod lengkokan adalah bergantung kepada nisbah panjang/diameter tiub dan diameter/tebal tiub.

2.7.1 Perubahan mod runtuh

Guoxing dan Tongxi (2003) melaporkan, apabila tiub dinding nipis bulat dikenakan bebanan mampatan sepaksi, ia runtuh sama ada pada keadaan simetri atau tidak simetri. Keadaan tersebut bergantung kepada nisbah diameter/tebal tiub, D/t . Mod simetri kerap dikenali sebagai mod cincin atau mod *concertina*. Manakala bagi mod bukan simetri dirujuk sebagai mod berlian. Perbezaan perubahan mod runtuh ditunjukkan dalam Rajah 2.10.

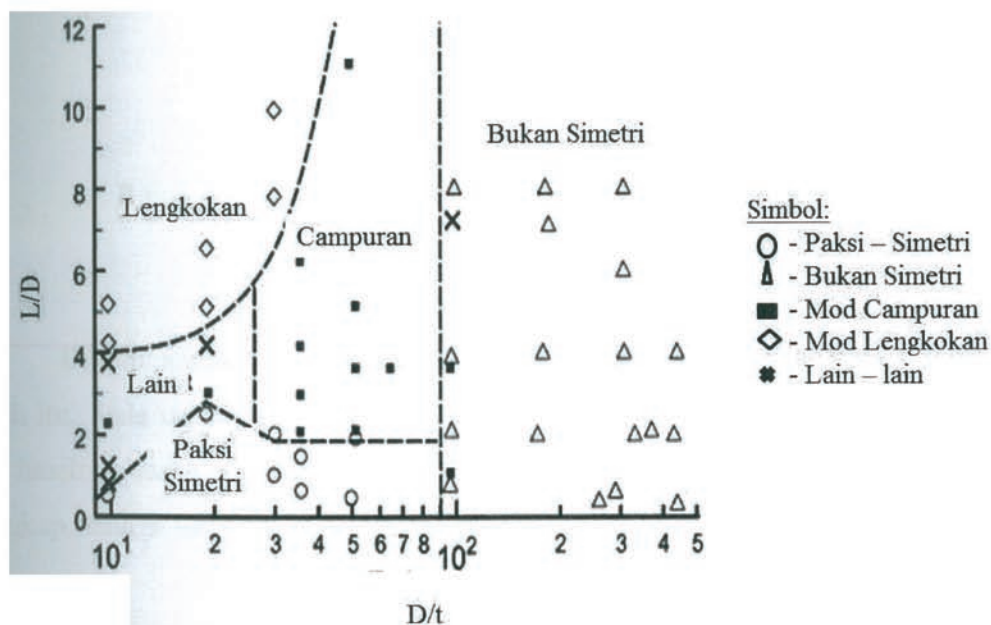
Berdasarkan sebilangan besar eksperimen pada tiub yang pelbagai dimensi, carta pengelasan mod boleh digunakan untuk pemilihan geometri tiub (Guoxing dan Tongxi, 2003). Rajah 2.11 adalah menunjukkan kriteria perubahan runtuh tiub dinding nipis. Secara umum, mod berlian terjadi apabila nisbah D/t lebih besar daripada nilai 80. Bagi nisbah D/t yang kurang daripada nilai 50, menghasilkan mod cincin dengan menunjukkan nisbah panjang/diameter tiub, L/D kurang daripada nilai 2. Nisbah L/D lebih besar daripada nilai 2 akan menghasilkan mod campuran. Manakala apabila nisbah L/D lebih daripada 4 dan nisbah D/t kurang daripada 30 maka, kecenderungan tiub berlaku lengkokan apabila dikenakan bebanan mampatan atau runtuh (Guillow *et al.*, 2001).



Rajah 2.10: Mod runtuh tiub silinder di bawah bebanan sepaksi, (a) mod cincin.

(b) mod berlian. (c) mod campuran.

(Guoxing *et al.*, 2003)



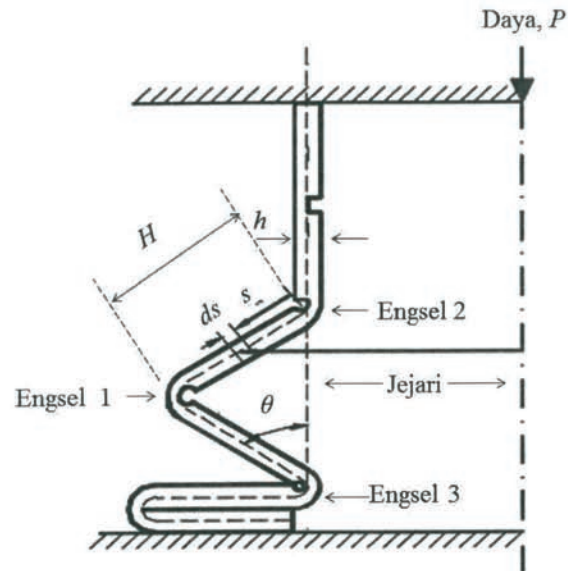
Rajah 2.11: Pengkelasan mod runtuh tiub dinding nipis.

(Guillow, S.R., Lu, G. dan Grzebieta, R.H. 2001)

2.7.2 Teori mod runtuh cincin Alexander

Model yang ditunjukkan pada Rajah 2.12 adalah pembentukan lipatan tunggal dan engsel lilitan plastik semasa prosesan runtuh berlaku. Lipatan berlaku secara lengkap, yang mana di antara engsel-engsel diterjemahkan sebagai lilitan terikan tegangan (Alexander, 1960). Teori mod runtuh cincin Alexander ini turut

digunakan dan perbincangkan dalam kajian Mirzaei, M. *et al.* (2012) terhadap eksperimen dan analisis pada tiub hibrid di bawah bebanan kuasi-statik.



Rajah 2.12: Teori model mudah untuk runtuh paksi simetri.
(Alexander, 1960)

Dalam analisis berikut, bahan dianggap sebagai plastik tegar sepenuhnya. Oleh itu, tiada interaksi di antara lenturan dan regangan dalam kriteria ini. Demikian itu, hasilnya sama ada berlaku lengkokan atau regangan sahaja. Untuk satu runtuh lengkap, tenaga lentur plastik adalah:

$$W_b = 2M_0\pi D \frac{\pi}{2} + 2M_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \pi(D + 2H \sin \theta) d\theta \quad (2.5)$$

atau

$$W_b = 2\pi M_0 (\pi D + 2H) \quad (2.6)$$

di mana, H adalah separuh panjang lipatan tiub dan D adalah diameter luar tiub. M_0 adalah momen lenturan plastik penuh per unit panjang dan $d\theta$ adalah perubahan sudut lipatan dinding tiub. Manakala, persamaan tenaga daripada regangan:

$$W_s = 2 \int_0^H Y \pi D H \ln \left[\left(\frac{D + 2s \sin \theta}{D} \right) \right] ds \quad (2.7)$$

di mana, Y adalah tegangan alah, ds adalah perubahan panjang lipatan dan apabila $\theta = \pi/2$, dinyatakan sebagai:

$$W_s \approx 2\pi Y h H^2 \quad (2.8)$$

Persamaan ini didapati dengan mengambil kira perubahan terhadap kawasan di antara tiga engsel, $\{=2[\pi(D+2H)^2/4-\pi D^2/4]-2\pi DH=2\pi H^2\}$, dan didarabkan dengan Yh , bagi daya pengalihan selaput per unit panjang. Daripada imbalan tenaga, kerja luar telah diserap oleh tenaga plastik dalam lenturan dan regangan. Maka:

$$P_m 2h = W_b + W_s \quad (2.9)$$

di mana, P_m adalah tenaga purata luaran lipatan yang lengkap dan h adalah tebal dinding nipis tiub. Penggantian persamaan 2.6 dan 2.8 ke dalam persamaan 2.9, maka:

$$\frac{P_m}{Y} = \frac{\pi h^2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\pi D}{2H} + 1 \right) + \pi H h \quad (2.10)$$

Nilai H yang tidak diketahui ditentukan dengan mengandaikan nilai H dengan daya luaran (P_m) yang minimum. Oleh itu, dengan mengandaikan $\frac{\partial P_m}{\partial H} = 0$, maka:

$$H = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2\sqrt{3}} \right)} \sqrt{Dh} \approx 0.95 \sqrt{Dh} \quad (2.11)$$

Dengan menggantikan persamaan 2.11 ke dalam persamaan 2.10, ia dinyatakan sebagai:

$$\frac{P_m}{Y} \approx 6h \sqrt{Dh} + 1.8h^2 \quad (2.12)$$

RUJUKAN

- Ahmad, Z., & Thambiratnam, D. P. (2009). Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading. *Computers & Structures*, 87(3), 186-197.
- Aktay, L., Johnson, A. F., Toksoy, A. K., Kröplin, B. H., & Güden, M. (2008). Modeling the progressive axial crushing of foam-filled aluminum tubes using smooth particle hydrodynamics and coupled finite element model/smooth particle hydrodynamics. *Materials & design*, 29(3), 569-575.
- Al Galib, D., & Limam, A. (2004). Experimental and numerical investigation of static and dynamic axial crushing of circular aluminum tubes. *Thin-Walled Structures*, 42(8), 1103-1137.
- Alexander, J.M. (1960) An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*. 13, 10-15.
- Alghamdi, A. A. A. (2001). Collapsible impact energy absorbers: an overview. *Thin-walled structures*, 39(2), 189-213.
- Al-Qrimli, H. F. A., Aljibori, H. S. S., & Fadhil Abbas, M. (2010). Energy Absorption of Thin-Walled Composite Tubes Subjected under Quasi-static Compression. *2010 Second International Conference*, In Computer and Network Technology (ICCNT), IEEE, pp.545-549.
- Beard, S. J., & Chang, F. K. (2002). Energy absorption of braided composite tubes. *International Journal of Crashworthiness*, 7(2), 191-206.
- Belytschko, T., Tsay, C. S., & Lui, W. K. (1981). A stabilization matrix for the bilinear Mindlin plate element. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 29(3), 313-327.

- Bheemineni, V. K., Käfer, B., Lammer, H., Kotnik, M., & Riemelmoser, F. O. (2013). Energy Absorption and Axial Tearing Behaviour of Metallic Tubes Using Angled Dies: Experimental and Numerical Simulation. *The World Academy of Science, Engineering and Technology*, 79, 629-633.
- Bisagni C., Di Pietro, G., Frascini, L., & Terletti, D. (2005). Progressive crushing of fiber-reinforced composite structural components of a Formula One racing car. *Composite structures*, 68(4), 491-503.
- Carney III, J.F. (1993) Motorway impact attenuation devices: past. Present and future, in *Structural Crashworthiness and Failure* (eds N. Jones and T. Wierzbicki). Elsevier, London & New York, 423 – 66.
- Chandrupatla, T. R., Belegundu, A. D., Ramesh, T., & Ray, C. (2002). *Introduction to finite elements in engineering*. 3d edition. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Deshpande, A. P. (2005). *Finite element study of energy absorption in corrugated beams*. Wichita State University: Doctoral dissertation.
- El-Hage, H., Mallick, P. K., & Zamani, N. (2006). A numerical study on the quasi-static axial crush characteristics of square aluminum – composite hybrid tubes. *Composite structures*, 73(4), 505 – 514.
- Federation International de l'Automobile (FIA). (2003). Formula 1 Technical Regulation.
- Fyllingen, Ø., Hopperstad, O. S., Hanssen, A. G., & Langseth, M. (2010). Modelling of tubes subjected to axial crushing. *Thin-walled structures*, 48(2), 134-142.
- Grzebieta, R. H. (1990). An alternative method for determining the behaviour of round stocky tubes subjected to an axial crush load. *Thin-walled structures*, 9(1), 61-89.
- Guillow, S.R., Lu, G. dan Grzebieta, R.H. (2001) Quasi – static axial compression of thin – walled circular aluminium tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*. 43, 2103 – 23.
- Guoxing Lu, Tongxi Yu (2003). *Energy absorption of structures and materials*. Cambridge England: Woodhead Publishing Ltd.
- Hallquist, J. O. (2005). ANSYS/LS-DYNA theoretical manual (M). *Livermore Software Technology Corporation, USA*.

- Han, H., Taheri, F., Pegg, N., & Lu, Y. (2007) A numerical study on the axial crushing response of hybrid pultruded and $\pm 45^\circ$ braided tubes. *Composite structures*, 80 (2), 253 – 264.
- Han, Haipeng, Farid Taheri, & Neil Pegg. (2007) "Quasi-static and dynamic crushing behaviors of aluminum and steel tubes with a cutout." *Thin-walled structures*, 45.3, 283-300.
- Hashin, Z. (1980). Failure criteria for unidirectional fiber composites. *Journal of applied mechanics*, 47(2), 329-334.
- Huang Jiancheng, & Xinwei Wang (2009). "Numerical and experimental investigations on the axial crushing response of composite tubes." *Composite Structures*, 91(2), 222-228.
- Huang, M. Y., Yuh-Shiou Tai, & H. T. Hu. (2012) "Numerical Study on Hybrid Tubes Subjected to Static and Dynamic Loading." *Applied Composite Materials*, 19(1), 1-19
- Huang, X. & Lu, G. (2003) Axisymmetric progressive crushing of circular tubes. *International Journal of Crashworthiness*, 8, 87 – 95.
- Jabatan Pengangkutan Jalan. (2013). *Statistik jumlah pendaftaran motorcar mengikut tahun*. Putrajaya: Kementerian Pengangkutan Malaysia.
- Johnson, W., Soden, P.D. & Al-Hassani. S.T.S. (1977) Inextensional collapse of thin-walled tubes under axial compression. *J. Strain Analysis* 12, 317 – 347.
- Kementerian Pengangkutan Malaysia (2010). *Statistik Pengangkutan Malaysia 2010*. Kuala Lumpur: Kementerian Pengangkutan Malaysia.
- Kindervater, C. M., Johnson, A. F., Kohlgrüber, D., Lützenburger, M., & Pentecote, N. (2000). Crash and impact simulation of aircraft structures-hybrid and FE based approaches. *In European congress on computational methods in applied sciences and engineering*. Barcelona, Spain: ECCOMAS.
- Langseth, M., Hopperstad, O. S., & Berstad, T. (1999). Crashworthiness of aluminium extrusions: validation of numerical simulation, effect of mass ratio and impact velocity. *International Journal of Impact Engineering*, 22(9), 829-854.
- Lanzi, L., Castelletti, L. M. L., & Anghileri, M. (2004). Multi-objective optimisation of composite absorber shape under crashworthiness requirements. *Composite structures*, 65(3), 433-441

- Li, Z., Yu, J., & Guo, L. (2012). Deformation and energy absorption of aluminum foam-filled tubes subjected to oblique loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, 54(1), 48-56.
- LS-DYNA keyword user's manual (2005). LSTC, Livermore, CA, V970.
- Marzbanrad, J., & Ebrahimi, M. R. (2011). Multi-objective optimization of aluminum hollow tubes for vehicle crash energy absorption using a genetic algorithm and neural networks. *Thin-Walled Structures*, 49(12), 1605-1615.
- Macaulay, M.A. & Redwood, R.G. (1964). Small scale model railway coaches under impact. *The Engineering*, 25, 1041-1046.
- Mirzaei, M., Shakeri, M., Sadighi, M., & Akbarshahi, H. (2012). Experimental and analytical assessment of axial crushing of circular hybrid tubes under quasi-static load. *Composite Structures*, 94, 1959-1966.
- Madenci, Erdogan, & Ibrahim Guven. (2006). *The finite element method and applications in engineering using ANSYS*. The University of Arizona. Springer.
- Mamalis, A. G. Mamolakos, D. E. Loannidis, M. B. Kostazos, P. K. & Hassiotis, G. (2001). Finite element simulation of the axial collapse of thin – wall square frusta. *International journal of crashworthiness*. 6(2), 155 – 164.
- Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., & Viegelaahn, G. L. (1989). The axial crushing of thin PVC tubes and frusta of square cross-section. *International Journal of Impact Engineering*, 8(3), 241-264.
- McGregor, C. J., Vaziri, R., Poursartip, A., & Xiao, X. (2007). Simulation of progressive damage development in braided composite tubes under axial compression. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(11), 2247-2259.
- Olabi, A. G., Morris, E., & Hashmi, M. S. J. (2007). Metallic tube type energy absorbers: a synopsis. *Thin-walled structures*, 45(7), 706-726.
- Oshkovr, S. A., Taher, S. T., Oshkour, A. A., Ariffin, A. K., & Azhari, C. H. (2013). Finite element modelling of axially crushed silk/epoxy composite square tubes. *Composite Structures*, 95, 411-418.
- Rashedi, A., Sridhar, I., Tseng, K. J., & Srikanth, N. (2015). Minimum mass design of thin tubular structures under eccentric compressive loading. *Thin-Walled Structures*, 90, 191-201.

- Reid, S. R. (1993). Plastic deformation mechanisms in axially compressed metal tubes used as impact energy absorbers. *International Journal of Mechanical Sciences*, 35(12), 1035-1052.
- Shermer, M. (2012). As far as her eyes can see: a review of Knocking on Heaven's Door: How Physics and Scientific Thinking Illuminate the Universe and the Modern World. *Skeptic (Altadena, CA)*, 17(2), 56-58.
- Sheshadri, A. (2006). *Design and analysis of a composite beam for side-impact protection of occupants in a sedan*. Wichita State University: Doctoral dissertation.
- Shetty, S. K. (2006). *Finite element study of energy absorption characteristics of a hybrid structure-composite wrapped on a square metal tube*. Wichita State University: Doctoral dissertation.
- Singace, A. A., Elsobky, H., & Reddy, T. Y. (1995) On the eccentricity factor in the progressive crushing of tubes. *International Journal of Solids and Structures*, 32(24), 3589-3602.
- Song HW, Wan ZM, Xie ZM, & Du XW.(2000) Axial impact behavior and energy absorption efficiency of composite wrapped metal tube. *International Journal of Impact Engineering*, 24, 385-401
- Tang, Z., Liu, S., & Zhang, Z. (2013). Analysis of energy absorption characteristics of cylindrical multi-cell columns. *Thin-Walled Structures*, 62, 75-84.
- Tarlochan, F., Samer, F., Hamouda, A. M. S., Ramesh, S., & Khalid, K. (2013). Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces. *Thin-Walled Structures*, 71, 7-17.
- Wang, X., & Lu, G. (2002). Axial crushing force of externally fibre-reinforced metal tubes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 216(9), 863-874.
- Wierzbicki, T. & Hanefi, E.H. (1996). Axial resistance and energy absorption of externally reinforced metal tubes. *Composites Part B: Engineering*, 27(5), 387-394.

- Xiao, X., Botkin, M. E., & Johnson, N. L. (2009). Axial crush simulation of braided carbon tubes using MAT58 in LS-DYNA. *Thin-Walled Structures*, 47(6), 740-749.
- Yamada, Y., Banno, T., Xie, Z., & Wen, C. E. (2005). Energy absorption and crushing behaviour of foam-filled aluminium tubes. *Materials transactions*, 46(12), 2633-2636.
- Zhou, Q. (2001). Applications of Cellular Materials and Structures in Vehicle Crashworthiness and Occupant Protection. *Engineering Plasticity and Impact Dynamics: China*, 28-30 December 2001, 97.
-