

PEMODELAN KOTAK PERLANGGARAN FUNGSI BAHAN BERGRED
BERASASKAN ALUMINIUM UNTUK REKABENTUK PERLINDUNG LAGA

MOHAMAD RUSYDI BIN ZAINAL ABIDIN

Laporan projek ini dikemukakan sebagai
memenuhi sebahagian daripada syarat penganugerahan
Sarjana Kejuruteraan Mekanikal

Fakulti Kejuruteraan Mekanikal dan Pembuatan
Universiti Tun Hussein Onn Malaysia

JANUARI 2014

ABSTRAK

Di dalam kajian ini, simulasi hentaman kotak perlanggaran fungsi bahan bergred aluminum (Al FGM) yang dihasilkan melalui kaedah rawatan haba bagi menentukan daya maksimum dan tenaga yang mampu diserap dijalankan. Kotak perlanggaran Al FGM dihasilkan dengan mengenakan suhu yang berbeza pada kedua-dua hujung tiub Al berkeratan rentas empat segi sama selama 4 jam. Perbezaan suhu rawatan haba yang dialami di sepanjang tiub Al menyebabkan perubahan mikrostruktur di sepanjang ketinggian. Perubahan mikrostruktur ini menyebabkan sifat mekanik bahan tiub Al berubah secara berterusan bagi menghasilkan kotak perlanggaran Al FGM. Sifat bahan pada sebarang titik di sepanjang ketinggian kotak perlanggaran Al FGM ditentukan berdasarkan taburan suhu dan data ujikaji. Kaedah interpolasi Lagrange digunakan untuk meramalkan perubahan sifat bahan pada sebarang titik di sepanjang ketinggian kotak perlanggaran Al FGM. Seterusnya, simulasi ujian bebanan kuasi-statik dan dinamik ke atas model kotak perlanggaran Al FGM dijalankan. Lima model kotak perlanggaran iaitu FGM0, FGM1, FGM2, FGM3 dan FGM4 yang masing-masing dikenakan suhu rawatan haba yang berbeza pada 25, 500, 520, 540 dan 560 °C dikaji. Hasil simulasi ujian bebanan kuasi-statik menunjukkan kotak perlanggaran FGM1 mempunyai daya maksimum iaitu 97.515 kN dan tenaga resapan tentu yang terbaik kerana mampu menyerap tenaga yang tinggi. Manakala bagi ujian bebanan dinamik pula, kotak perlanggaran FGM3 mencatatkan daya maksimum yang tertinggi iaitu 59.379 kN. Tenaga serapan maksimum yang mampu diserap oleh FGM1 ini adalah sebanyak 24.059 kJ/kg iaitu yang tertinggi berbanding kotak perlanggaran lain. Secara keseluruhan, kotak perlanggaran fungsi bahan bergred adalah lebih baik berbanding kotak perlanggaran seragam.

ABSTRACT

In this study, simulation of impact of aluminium functionally graded materials (Al FGM) crash boxes fabricated by heat treatment method to determine the maximum force and energy absorbed are carried out. The Al FGM crash box is fabricated by applying different temperatures at both ends of the square Al tube for 4 hours. The difference in temperature experienced by the Al tube along its height has resulted in different microstructural changes along the height of the Al tube. These microstructural changes resulting in mechanical properties of Al tube change continuously to produce an Al FGM crash box. The material properties at any point along the height of the Al FGM crash box are determined based on the distribution of temperature and the experimental data. Lagrange interpolation method is used to predict the variation in material properties at any point along the height of the Al FGM crash box. Then, the simulations of quasi-static and dynamic loading on the Al FGM crash boxes are performed. Five different crash boxes, namely FGM0, FGM1, FGM2, FGM3 and FGM4 for the different heat treatment temperatures of 25, 500, 520, 540 and 560 °C, respectively are investigated. The simulation results of quasi-static loading tests show that FGM1 has the maximum force of 97.515 kN and the best specific energy absorption because it can absorb more energy. However for dynamic loading test, the FGM3 recorded the highest maximum force 59.379 kN. The specific energy absorption that can be absorbed by FGM1 is of 24.059 kJ/kg which is the highest compared to other model. As conclusion based on the results obtained indicate that the FGM crash box is better than the conventionally uniform crash box.

KANDUNGAN

	TAJUK TESIS	i
	PENGAKUAN	ii
	DEDIKASI	iii
	PENGHARGAAN	iv
	ABSTRAK	v
	ABSTRACT	vi
	KANDUNGAN	vii
	SENARAI JADUAL	ix
	SENARAI RAJAH	x
	SENARAI SIMBOL	xii
	SENARAI LAMPIRAN	xiii
BAB 1	Pengenalan	1
	1.1 Latar belakang kajian	1
	1.2 Penyataan masalah	4
	1.3 Kepentingan kajian	4
	1.4 Objektif	5
	1.5 Skop	5
	1.6 Susunan tesis	5
BAB 2	KAJIAN LITERATUR	6
	2.1 Pengenalan	6
	2.2 Fungsi bahan bergred	7
	2.3 Kotak perlanggaran perlindungan laga	9
	2.3.1 Rekabentuk kotak perlanggaran	10
	2.3.2 Eksperimen kotak perlanggaran	12
	2.3.2.1 Ujian bebanan kuasi-statik	13
	2.3.2.2 Ujian bebanan dinamik	14

2.3.3	Simulasi kotak perlanggaran	14
2.3.3.1	Sifat mekanikal bahan	17
2.4	Kajian terdahulu rekebentuk kotak perlanggaran fungsi bahan bergred aluminium	18
BAB 3	METODOLOGI	21
3.1	Pengenalan	21
3.2	Kaedah berangka	21
3.2.1	Pengkomputeran domain	21
3.2.2	Ramalan sifat mekanikal bahan	25
3.2.3	Penentuan tenaga resapan	25
3.2.4	Keadaan sempadan	26
3.2.4.1	Nisbah kelangsingan	27
3.2.4.2	Penentuan sifat mekanikal aloi aluminium EN 2024	28
3.2.4.3	Perolakan pemindahan haba	28
3.2.4.4	Sempadan rawatan haba	29
3.2.4.5	Sempadan kuasi-statik	30
3.2.4.6	Sempadan dinamik	30
3.2.5	Pemilihan jejaring	31
3.2.6	Persediaan simulasi terma fana	32
3.2.7	Persediaan bebanan kuasi statik dan bebanan dinamik	32
3.2.8	Prosedur analisa keputusan	33
BAB 4	KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN	34
4.1	Rawatan haba model kotak perlanggaran	34
4.1.1	Sifat bahan kotak perlanggaran aluminium	35
4.2	Bebanan kuasi-statik kotak perlanggaran	38
4.3	Bebanan dinamik kotak perlanggaran	42
BAB 5	KESIMPULAN DAN CADANGAN	46
5.1	Kesimpulan	46
5.2	Cadangan kajian masa hadapan	47
	RUJUKAN	48
	LAMPIRAN	51

SENARAI JADUAL

2.1	Dimensi keratan rentas	11
2.2	Sifat-sifat kekuatan aloi aluminium 2024 T3	17
2.3	Sifat-sifat mekanikal aluminium aloi EN 2024 T4	18
3.1	Geometri model kotak perlanggaran	22
3.2	Parameter bahagian model	23
3.3	Taburan suhu	23
3.4	Saiz jejaring model	23
3.5	Klasifikasi tiang	27
3.6	Sifat mekanikal aluminium aloi EN 2024 T4	28
4.1	Sifat mekanikal kotak perlanggaran FGM aluminium	35
4.2	Senarai model simulasi yang dijalankan	38
4.3	Pergerakan ubah bentuk kotak perlanggaran (bebanan kuasi-statik)	39
4.4	Pergerakan ubah bentuk kotak perlanggaran (bebanan dinamik)	43

SENARAI RAJAH

2.1	Demostrasi untuk rekabentuk kotak perlanggaran, (a) sebelum hentaman, (b) selepas hentaman	6
2.2	Gambarajah fasa aluminium-titanium	8
2.3	Spesimen kaedah metalurgi serbuk	8
2.4	Sistem percetakan 3D	9
2.5	Rekabentuk kotak perlanggaran	10
2.6	Dimensi geometri dan keadaan beban	10
2.7	Bentuk keratan rentas kotak perlanggaran	11
2.8	Tenaga resapan kotak perlanggaran	12
2.9	Ubah bentuk aluminium berisi buih	13
2.10	Tenaga resapan melawan anjakan	14
2.11	Ubah bentuk pada tiub	14
2.12	Model geometri spesimen	15
2.13	Perbandingan penyerapan Tenaga jenis A, B dan C	15
2.14	Keadaan perlanggaran	16
2.15	Ubah bentuk kotak perlanggaran: (a) eksperimen; (b) analisa unsur terhingga	16
2.16	Perbezaan keputusan ekperimen dan simulasi	17
2.17	Tinggi dan tebal kotak perlanggaran	19
2.18	Model 3D unsur terhingga tiang berisi buih bergred	20
3.1	Carta aliran kajian	22
3.2	Model pengkomputeran	23
3.3	Lukisan skematik model	24
3.4	Bentuk keratan model kotak perlanggaran	26
3.5	Proses rawatan haba kaedah sepuhlindap	27

3.6	Lengkung tegasan - terikan	28
3.7	Keratan rentas susun atur sempadan model rawatan haba	29
3.8	Keratan rentas susun atur sempadan model ujian kuasi statik	30
3.9	Keratan rentas susun atur sempadan model ujian bebanan dinamik	31
3.10	Model jejaring kotak perlanggaran	31
3.11	Persediaan terma fana	32
3.12	Persediaan dinamik nyata (bebanan kuasi-statik dan dinamik)	33
4.1	Taburan suhu model kotak perlanggaran	34
4.2	Taburan suhu kotak perlanggaran fungsi bahan bergred aluminium	35
4.3	Lengkung tegasan-terikan	36
4.4	Tegasan alah dan tegasan tegangan muktamad dalam fungsi suhu	36
4.5	Tegasan alah kotak perlanggaran fungsi bahan bergred aluminium	37
4.6	Modulus Young kotak perlanggaran fungsi bahan bergred aluminium	38
4.7	Graf daya melawan anjakan (bebanan kuasi-statik)	40
4.8	Ciri-ciri penyerapan tenaga kotak perlanggaran dibawah bebanan kuasi-statik: F_{maks} dan SEA	41
4.9	Ciri-ciri penyerapan tenaga kotak perlanggaran dibawah bebanan kuasi-statik: Kecekapan tenaga musnah dan varians pekali tenaga musnah	42
4.10	Graf daya melawan anjakan (bebanan dinamik)	44
4.11	Ciri-ciri penyerapan tenaga kotak perlanggaran dibawah bebanan dinamik: F_{maks} dan SEA	45
4.12	Ciri-ciri penyerapan tenaga kotak perlanggaran dibawah bebanan dinamik: Kecekapan tenaga musnah dan varians pekali tenaga musnah	45

SENARAI SIMBOL

3D	-	3 Dimensi
Al	-	Aluminum
FGM	-	Fungsi bahan bergred
FGF	-	Fungsi buih bergred
N.L	-	Nisbah kelangsingan
PM	-	Metalurgi serbuk
SM	-	Sebelum masihi
SEA	-	Tenaga serapan tentu
T	-	Suhu
σ	-	Tegasan
σ_y	-	Tegasan alah
σ_{ult}	-	Tegasan tegangan muktamad
E	-	Modulus Young
F_{maks}	-	Daya maksimum
w	-	Lebar
l	-	Panjang
t	-	tebal
v	-	Halaju
r	-	Jejari
δ	-	Anjakan
R_{el}	-	Titik alah
$R_{p0.2}$	-	Tegangan alah
R_m	-	Tegasan tegangan
A_t	-	Pemanjangan muktamad
M	-	Jisim
EA	-	Tenaga resapan

SENARAI LAMPIRAN

A	Carta gantt	51
B	Lukisan terperinci	55

BAB 1

PENGENALAN

1.1 Latar belakang kajian

Fungsi Bahan Bergred ataupun *Functional Graded Material* (FGM) adalah campuran dua bahan yang mempunyai komposisi dan struktur bahan berbeza yang menghasilkan bahan baru yang mempunyai sifat-sifat yang berbeza daripada bahan asal. Bahan tersebut direka untuk fungsi dan aplikasi tertentu. Pelbagai kaedah boleh digunakan untuk menghasilkan fungsi bahan bergred. Antara proses untuk menghasilkan fungsi bahan bergred adalah leburan, lapisan, pukal dan pra-bentuk.

Sejarah penggunaan bahan logam bermula pada zaman sebelum masihi (SM), di mana bahan logam seperti gangsa, aloi kuprum dan timah telai ditemui. Gangsa banyak memberi kesan kepada peradaban manusia sehingga menjadi mercu tanda zaman kegemilangan peradaban manusia dikenali sebagai “Zaman Gangsa” pada tahun 4000 SM. Semejak itu, manusia telah melakukan pelbagai eksperimen menggabungkan aloi dengan bahan lain untuk meningkatkan sifat-sifat bahan tersebut. Namun terdapat kekangan di mana satu bahan boleh larut dalam larutan bahan lain disebabkan oleh had keseimbangan termodinamik. Apabila lebih kuantiti bahan pengalioian diperlukan, maka kaedah tradisional pengalioian tidak boleh digunakan. Satu lagi kekangan pengalioian konvensional ialah apabila pengalioian dua bahan berbeza dengan suhu takat lebur yang berbeza, ia menjadi kekangan untuk menggabungkan bahan melalui proses ini. Metalurgi serbuk atau *Powdered Metallurgy* (PM) adalah satu lagi kaedah menghasilkan bahagian yang tidak boleh dihasilkan melalui pengalioian konvensional. Aloi dihasilkan dalam bentuk serbuk dan beberapa masalah yang berkaitan dengan aloi konvensional dapat diatasi. Satu

lagi kaedah menghasilkan bahan adalah menggabungkan kombinasi sifatnya dengan bahan dalam keadaan pepejal, yang dikenali sebagai bahan komposit. Bahan komposit adalah kelas bahan termaju, terbentuk daripada satu atau lebih bahan yang digabungkan dalam keadaan pepejal dengan sifat-sifat fizikal dan kimia yang berbeza. Bahan komposit menunjukkan gabungan yang sangat baik sifatnya dan berbeza dari bahan asal serta lebih ringan. Kayu adalah bahan komposit dari alam semula jadi yang terdiri daripada selulosa dalam matriks lignin. Bahan komposit akan gagal di bawah keadaan kerja yang melampau melalui proses yang dipanggil nyahikatan ataupun *delamination* (pemisahan gentian daripada matriks). Ini boleh berlaku sebagai contoh, dalam aplikasi suhu tinggi di mana dua logam dengan pekali pengembangan yang berbeza digunakan. Penyelidik di Jepun pada pertengahan 1980-an, berhadapan dengan cabaran ini dalam menyiapkan projek pesawat hipersonik tahan haba (dengan suhu luaran iaitu 2000 K dan dalaman 1000 K keseluruhan tebal kurang daripada 10 mm). Daripada penyelidikan yang dibuat, maka terhasil konsep FGM (Mahamood et al, 2012).

Dalam industri automotif, kotak perlanggaran adalah salah satu komponen penting dalam menentukan keselamatan penumpang. Kotak perlanggaran digunakan untuk menyerap tenaga hentaman bagi menjamin keselamatan penumpang. Selain daripada keselamatan, kotak perlanggaran dapat menentukan kesan hentaman pada kenderaan. Bergantung kepada keadaan hentaman dan kenderaan yang digunakan, kriteria yang berbeza digunakan untuk menentukan struktur kotak perlanggaran. Kotak perlanggaran boleh dinilai sama ada secara prospektif, menggunakan model komputer (contohnya, *LS-DYNA*, *MSC-Dytran*, *MADYMO*) atau eksperimen, atau secara retrospektif dengan cara menganalisis hasil kemalangan. Beberapa kriteria yang digunakan untuk menilai prospektif kotak perlanggaran, termasuk corak perubahan bentuk struktur kenderaan, pecutan yang dialami kenderaan semasa hentaman dan kebarangkalian kecederaan diramalkan oleh model badan manusia. Kebarangkalian kecederaan ditakrifkan menggunakan kriteria parameter mekanikal (contohnya daya, pecutan atau perubahan bentuk) yang mempunyai kaitan dengan risiko kecederaan. Satu kriteria kecederaan yang biasa dialami ialah kriteria hentaman turus (*Head impact criterion*). Kotak perlanggaran dinilai secara retrospektif untuk dianalisa risiko kecederaan pada kemalangan sebenar. Pelbagai teknik statistik digunakan untuk mengawal jumlah perlanggaran.

Antara bahan yang sering digunakan sebagai kotak perlanggaran adalah aluminium. Aluminium digunakan dalam kebanyakan industri dan adalah sangat penting dalam ekonomi dunia. Komponen berstruktur yang diperbuat daripada aluminium dan aloi-aloinya adalah penting dalam industri aeroangkasa dan juga dalam kenderaan serta bangunan, di mana sifat ringan, ketahanan dan kekuatan diperlukan. Selain daripada itu, bahan aluminium mempunyai takat lebur yang rendah dan sangat mudah untuk dikitar semula.

Aluminium adalah merupakan logam yang lembut, dengan warna keperakan pudar, lapisan pengoksidaan yang nipis terbentuk apabila didedahkan kepada udara. Aluminium tulen mempunyai kekuatan tegangan sebanyak 49 MPa, dan boleh meningkat sehingga 700 MPa sekiranya dibentuk menjadi aloi. Aluminium mempunyai ketumpatan satu pertiga daripada ketumpatan keluli atau tembaga; adalah boleh tempa, mulur dan mudah dimesin dan mempunyai daya tahan kakisan serta ketahanan yang sangat baik disebabkan lapisan pelindung oksidanya (Schmitz et al, 2006).

Pada masa kini, kaedah simulasi digunakan secara meluas dalam pelbagai bidang. Ini kerana kaedah simulasi lebih menjimatkan masa serta kos berbanding kaedah eksperimen. Perisian *ANSYS* adalah salah satu perisian simulasi yang sering digunakan selain daripada *ABAQUS*, *3D-DYNA* dan lain-lain lagi.

Dalam kajian ini, simulasi model kotak perlanggaran fungsi bahan bergred berasaskan aluminium direka untuk rekabentuk perlindungan laga. Kotak perlanggaran aluminium dihasilkan melalui rawatan haba. Hujung atas iaitu satu per empat daripada kotak perlanggaran dipanaskan pada suhu sekitar 500 °C sehingga 560 °C. Sementara hujung bawahnya pula iaitu satu per empat daripada panjang direndam dalam air yang mengalir pada suhu bilik sekitar 25 °C. Proses rawatan haba kotak perlanggaran aluminium dilakukan selama 4 jam. Perubahan taburan suhu pada bahan aluminium dikaji dengan andaian tiada haba mengalir keluar semasa pemanasan dilakukan. Selepas proses rawatan haba, ujian kuasi-statik dan bebanan dinamik dilakukan untuk menentukan tenaga resapan dan daya maksimum yang dikenakan ke atas kotak perlanggaran tersebut. Tenaga resapan dan daya maksimum simulasi kotak perlanggaran FGM akan dibandingkan dengan kotak perlanggaran tanpa rawatan haba.

1.2 **Penyataan masalah**

Kotak perlanggaran merupakan salah satu komponen kereta yang penting bagi menyerap tenaga ketika berlakunya kemalangan. Ia dipasang di antara *bumper* dan kerangka hadapan bagi sesebuah kereta. Pada masa kini, ia telah direka dalam pelbagai bentuk. Perbezaan rekabentuk ini adalah antara usaha yang dilakukan untuk mengoptimumkan tahap keselamatan pengguna kereta.

Namun, penghasilan bentuk yang rumit seringkali menyukarkan proses pemasangan kotak perlanggaran tersebut pada bahagian hadapan kereta. Justeru, satu penyelidikan perlu dilakukan bertujuan untuk menghasilkan kotak perlanggaran yang ringkas dan mengekalkan sifat kekerasan pada kotak perlanggaran seperti sedia ada. Struktur yang akan digunakan di dalam kajian ini ialah kotak perlanggaran berbentuk segi empat berongga yang akan dikenakan rawatan haba. Ia dijangka dapat mengurangkan masalah semasa proses pemasangan tanpa mengurangkan ciri-ciri keselamatannya.

1.3 **Kepentingan kajian**

Kereta merupakan kenderaan yang penting bagi setiap manusia pada masa kini. Pelbagai kajian telah dijalankan bagi memastikan aspek keselamatan kepada pemandu dan juga penumpang berada pada tahap yang paling optimum. Salah satu ciri-ciri keselamatan yang penting adalah kotak perlanggaran yang dipasang pada bahagian hadapan sesebuah kereta.

Bagi memudahkan proses pemasangan, bentuk dan juga kaedah rawatan haba terhadap kotak perlanggaran perlu dikaji bagi memastikan sifat-sifat yang ada padanya dapat dikekalkan dan dapat menahan hentaman yang kuat ketika berlakunya kemalangan, sekaligus dapat mengurangkan risiko kepada pengguna kereta. Bentuk keratan rentas yang akan digunakan adalah segi empat berongga. Bentuk ini didapati ringkas dan mudah untuk proses pemasangan pada bahagian hadapan kereta. Dengan itu, ia dijangka dapat menjimatkan masa dan juga tenaga pekerja serta dapat mengurangkan kos pembuatan dan pemasangan.

Kajian ini sememangnya akan mendapat perhatian yang serius, terutamanya kepada industri pemotoran memandangkan permintaan yang tinggi, sama ada

tempatan mahupun diperingkat antarabangsa. Namun apa yang lebih penting ialah aspek keselamatan pengguna perlu dijaga dalam penghasilan sesebuah produk. Justeru, kelakuan kotak perlanggaran dikaji melalui ujian perlanggaran bagi memastikan keselamatan penumpang terjamin.

1.4 Objektif kajian

Objektif kajian ini adalah:

- i. Meramal tenaga resapan dan daya maksimum pada kotak perlanggaran fungsi bahan bergred berasaskan aluminium.
- ii. Membandingkan daya maksimum dan tenaga resapan model kotak perlanggaran fungsi bahan bergred aluminium yang dikenakan rawatan haba dengan tanpa rawatan haba.

1.5 Skop kajian

Skop kajian adalah tertumpu pada:

1. Kotak perlanggaran berongga berkeratan rentas segi empat dan diperbuat daripada aluminium.
2. Simulasi model kotak perlanggaran dibangunkan menggunakan perisian *ANSYS*.

1.6 Susunan tesis

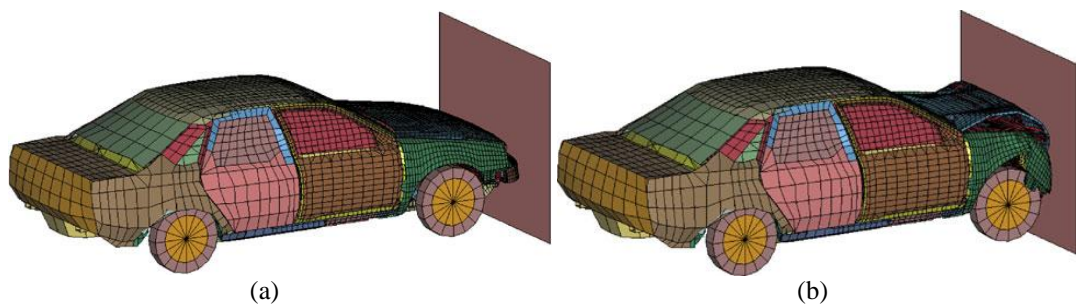
Susunan bab disusun mengikut aliran kerja kajian. Bab 2 membincangkan kajian literatur yang dilakukan oleh kajian terdahulu. Dalam Bab 3 menerangkan kaedah metodologi yang akan digunakan untuk menjalankan simulasi rawatan haba dan ujian bebanan. Manakala, Bab 4 menerangkan keputusan dan analisa yang diperolehi daripada simulasi tersebut. Kesimpulan dan cadangan kajian masa hadapan daripada simulasi tersebut akan dibincangkan dalam Bab 5.

BAB 2

KAJIAN LITERATUR

2.1 Pengenalan

Kotak perlanggaran sering digunakan dalam pelbagai industri pengangkutan seperti industri automobil, aeroangkasa, perkapalan dan sebagainya. Tujuannya adalah untuk meningkatkan kebolehan kenderaan tersebut menahan hentaman atau bebanan yang dikenakan ke atas rekabentuk tersebut. Dalam industri automobil, komponen keselamatan yang sering diuji keberkesannya adalah beg udara, tali pinggang keledar, *bumper* hadapan dan belakang serta struktur kereta. Sebelum sesuatu komponen dihasilkan, kajian simulasi dilakukan untuk menilai kebolehan komponen tersebut. Hasil keputusan diperolehi dan dianalisa untuk menghasilkan komponen terbaik. **Rajah 2.1** menunjukkan contoh demostrasi kotak perlanggaran yang digunakan untuk simulasi kenderaan.



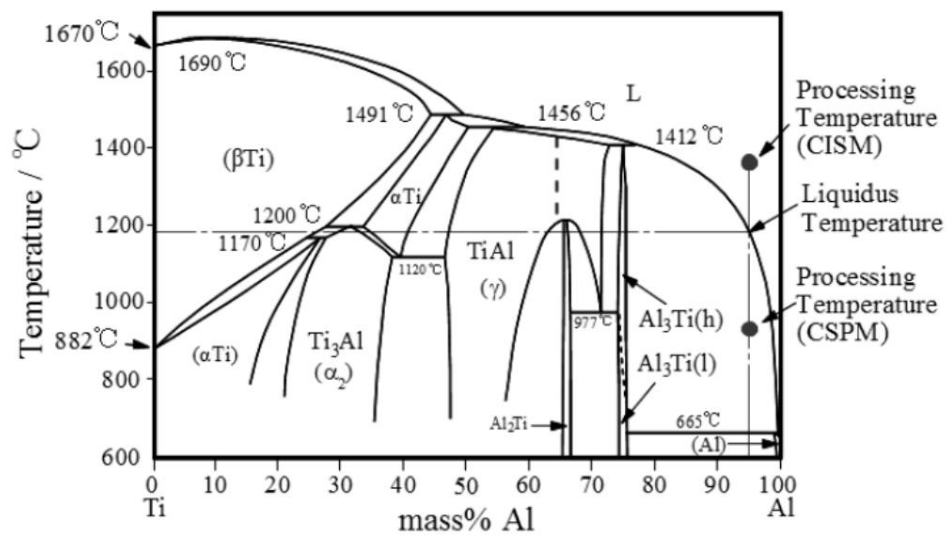
Rajah 2.1: Demostrasi untuk rekabentuk kotak perlanggaran, (a) sebelum hentaman, (b) selepas hentaman (Sun et al, 2011)

2.2 Fungsi bahan bergred

Fungsi bahan bergred mempunyai komposisi yang berbeza daripada bahan asal. Ia dikategorikan sebagai bahan termaju dan mampu digunakan dalam pelbagai bidang. Menurut Mahamood et al (2012), terdapat pelbagai kaedah yang digunakan untuk menghasilkan fungsi bahan bergred. Antara kaedah menghasilkan fungsi bahan bergred adalah kaedah rawatan haba, empar, metalurgi serbuk, teknik pemendapan wap dan kaedah pembentukkan pepejal berbentuk bebas.

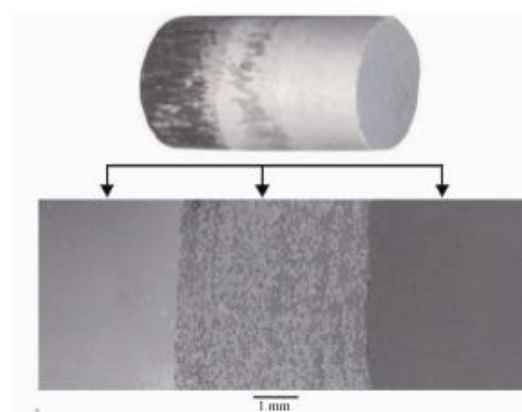
Dalam kaedah rawatan haba, pemanasan dikenakan pada sebarang tempat atau spesimen akan dapat mengubah sifat mekanikal bahan. Peixinho et al (2012) dalam kajiannya telah menggunakan kaedah rawatan haba pada kawasan tertentu suatu struktur aloi aluminium untuk mengubah sifat bahan. Tujuan utama keadah ini dilakukan adalah untuk mendorong pengubahsuaian sifat bahan di kawasan setempat untuk bertindak sebagai pemicu kepada proses lipatan. Proses lipatan merupakan satu kelebihan dalam kestabilan menghancurkan dan pengurusan beban. Mikrostruktur aloi aluminium diubah suai dalam fungsi suhu. Perubahan yang paling ketara dalam struktur mikro aloi aluminium berlaku dalam julat suhu antara 250 dan 550 °C di mana terdapat penurunan dalam kekerasan. Perubahan itu dikaitkan kepada penuaan dan kesan leburan kerana kitaran haba yang dikenakan. Pemilihan parameter kitaran pemanasan diperuntukkan adalah amat besar bagi tujuan pelembutan aloi.

Kaedah empar adalah sama seperti kaedah tuangan empar di mana daya graviti digunakan untuk memutarakan acuan untuk membentuk fungsi bahan bergred pukal. Watanabe et al(2011) dan El-Hadad et al (2010), dalam kajiannya, telah menggunakan kaedah empar dalam menghasilkan fungsi bahan bergred mempunyai kecerunan yang berbeza ketumpatan bahan. Pelbagai kategori kaedah empar digunakan seperti kaedah empar *in-situ*, kaedah empar buburan dan kaedah empar tekanan. Kaedah empar ini akan membentuk mikrostruktur yang berbeza bergantung kepada bahan yang digunakan. Semasa kaedah empar dilakukan, bahan berada dalam keadaan lebur untuk memastikan mikrostruktur bahan bergabung ikatan antara satu sama lain. **Rajah 2.2** menunjukkan gambarajah fasa bagi aluminium-titanium untuk membentuk fungsi bahan bergred. Gambarajah fasa dapat menentukan mikrostruktur bahan apabila komposisi yang berbeza digunakan.



Rajah 2.2: Gambarajah fasa aluminium-titanium (El-Hadad et al, 2010)

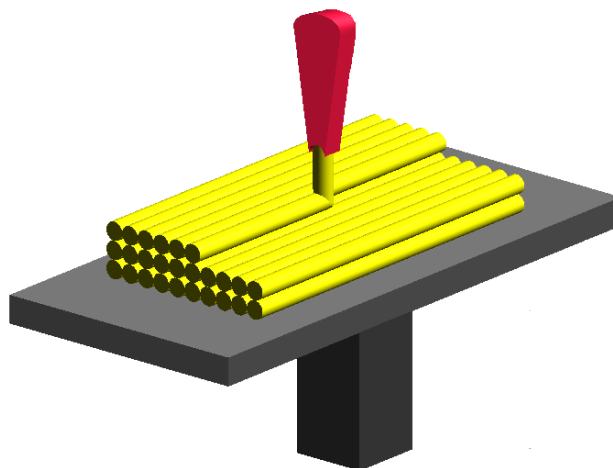
Shahrjerdi et al (2011) dan Nemat-Alla et al (2011) telah menggunakan metalurgi serbuk dalam menghasilkan FGM. Langkah-langkah yang digunakan untuk membentuk FGM seperti mencampurkan bahan yang berbeza menjadi bahan yang baru. Bahan yang berbeza perlu dicampurkan untuk membentuk sebatian baru. Suhu mengabungkan serbuk dalam julat 0.7 sehingga 0.9 daripada titik lebur bahan. **Rajah 2.3** menunjukkan lapisan spesimen yang terbentuk melalui kaedah metalurgi serbuk.



Rajah 2.3: Spesimen kaedah metalurgi serbuk (Nemat-Alla et al, 2011)

Knoppers et al (2005) telah menggunakan kaedah pembentukan pepejal berbentuk bebas, di mana kaedah ini biasanya digunakan pada pembuatan deras. Penghasilan produk menggunakan teknik ini dibentuk daripada lapisan-lapisan

serbuk bahan yang berbeza. Bahan tersebut akan mencetak dan membentuk pelbagai produk yang dilukis dalam perisian *AutoCAD*. **Rajah 2.4** menunjukkan sistem percetakan 3D dalam pembuatan deras.



Rajah 2.4: Sistem percetakan 3D (Pham et al, 2001)

Groves et al (1997) menggunakan kaedah pemendapan wap dalam menghasilkan FGM komposit matrik logam. Proses ini adalah gabungan pengewapan di bawah vakum rendah rasuk-e dan wap gas untuk membentuk pemendawapan berterusan pada aloi, logam dan seramik. Halaju gas dan tekanan kebuk menentukan kecekapan, taburan dan mikrostruktur bahan.

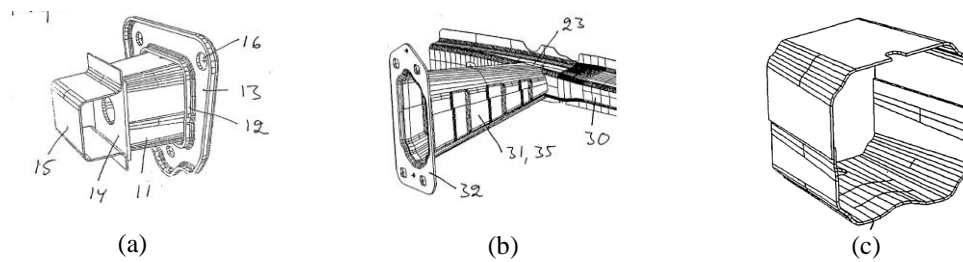
2.3 Kotak perlanggaran perlindungan laga

Kotak perlanggaran adalah salah satu komponen yang penting pada bahagian kereta. Ia bertindak sebagai penyerap tenaga ketika berlakunya kemalangan. Kotak perlanggaran akan remuk dengan menyerap tenaga hentaman sebelum resapan tersebut berpindah ke bahagian-bahagian badan yang lain supaya kerosakan bingkai kabin utama dapat dikurangkan dan sekali gus dapat mengurangkan kesan perlanggaran kepada penumpang.

Rekabentuk kotak perlanggaran perlindungan laga mempunyai ciri-ciri keselamatan yang tinggi, kos yang efisien dan kesan yang baik kepada alam sekitar. Kebolehannya menyerap tenaga yang banyak adalah ciri penting dalam industri kenderaan.

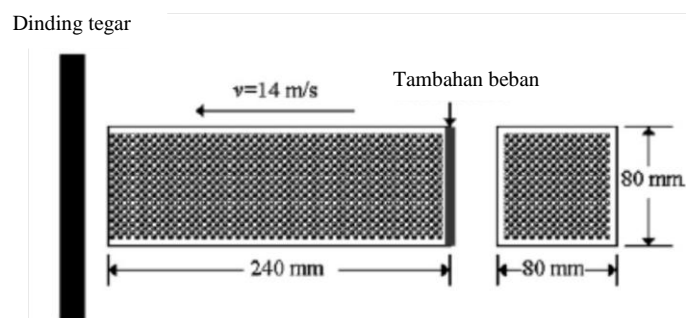
2.3.1 Rekabentuk kotak perlanggaran

Berdasarkan perincian paten Eropah (Nilsson, 2005), terdapat pelbagai bentuk kotak perlanggaran direka untuk menyerap tenaga semasa perlanggaran. **Rajah 2.5** menunjukkan antara rekabentuk kotak perlanggaran yang digunakan untuk menyerap tenaga.



Rajah 2.5: Rekabentuk kotak perlanggaran (Nilsson, 2005)

Sun et al (2010) telah melakukan kajian terhadap lapisan model untuk menganggarkan buih bergred. Struktur model yang dikaji berbentuk tiang dengan keratan rentas empat segi sama berdinding nipis serta dipenuhi dengan fungsi buih bergred aluminium. Keratan rentas model adalah $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ dan panjangnya adalah 240 mm . Halaju awal struktur 14 ms^{-1} bergerak menuju pada dinding tegar. Jisim seberat 460 kg diletakkan pada struktur tersebut seperti **Rajah 2.6**.



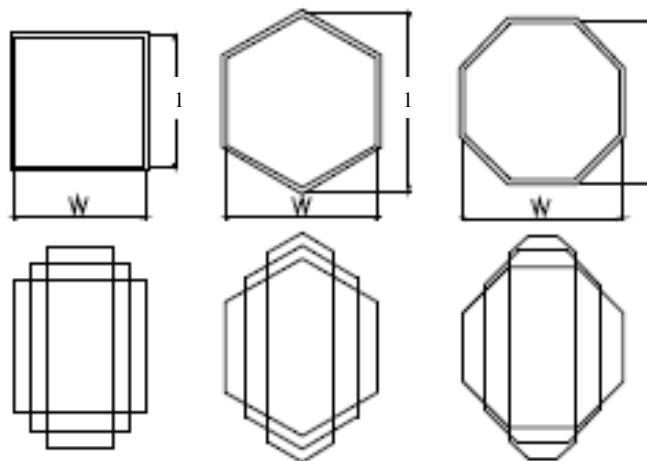
Rajah 2.6: Dimensi geometri dan keadaan beban (Sun et al, 2010)

Kim (2008), telah mengkaji struktur tiang dengan pelbagai bentuk keratan rentas untuk kotak perlanggaran adalah segi empat tepat, heksagon dan oktagon. Kotak perlanggaran yang dikaji mempunyai tinggi 170 mm dan tebal 3 mm pada

ketiga-tiga bentuk kotak perlanggaran. Luas keratan rentas ketiga-tiga bentuk kotak perlanggaran adalah sama iaitu 970 mm^2 seperti yang ditunjukkan dalam **Jadual 2.1** dan **Rajah 2.7**.

Jadual 2.1: Dimensi keratan rentas (Kim, 2008)

Bentuk	Model	w (mm)	l (mm)	l/w
Segi empat	R1	80	80	1.00
	R2	60	100	1.67
	R3	40	120	3.00
Heksagon	H1	92.37	106.66	1.16
	H2	66.18	121.79	1.84
	H3	40	136.9	3.42
Oktagon	O1	96.57	96.57	1.00
	O2	68.27	115.15	1.69
	O3	40	133.72	3.34

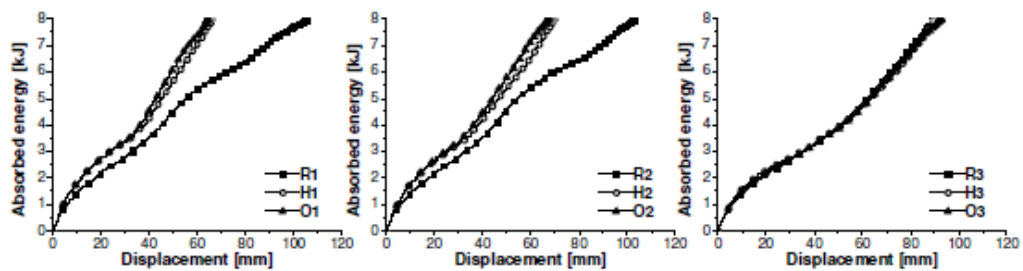


Rajah 2.7: Bentuk keratan rentas kotak perlanggaran (Kim, 2008)

Zarei et al (2010), telah membuat kajian mengenai ujian hentaman paksi terhadap kotak perlanggaran berkeratan rentas segi empat dan heksagon serta ketebalan yang berbeza. Kotak perlanggaran ini direka sama dengan sistem bumper pada kereta BMW. Bahan yang digunakan adalah komposit. Tinggi keratan rentas segi empat dan heksagon adalah berbeza iaitu 150 mm dan 91 mm.

Berdasarkan daripada kajian Sun et al (2010), Zarei et al (2010) dan Kim et al (2008) menunjukkan rekabentuk dengan keratan rentas segi empat sering kali

digunakan. Ini kerana segi empat mudah dibentuk dan dipasang pada bahagian kereta. Selain daripada itu, keratan rentas segi empat akan menghasilkan keputusan yang seragam. Bagi keratan rentas heksagon dan oktagon, ia mampu menyerap tenaga resapan yang tinggi berbanding segi empat. Walau bagaimanapun, kajian Kim et al (2008) menunjukkan pengurangan saiz sisi akan menyebabkan tenaga resapan bagi keratan rentas yang berbeza adalah sama seperti dalam **Rajah 2.8**.



Rajah 2.8: Tenaga resapan kotak perlanggaran (Kim et al, 2008)

Dalam kajian ini, pemilihan keratan rentas segi empat dapat memudahkan analisa dan perbandingan keputusan antara eksperimen dengan simulasi. Perubahan bentuk pada keratan rentas segi empat mudah untuk dianalisa dan tenaga resapan dapat ditentukan dengan mudah walaupun kajian dilakukan berbeza bahan, kaedah, tebal dan panjang keratan rentas.

2.3.2 Ekperimen kotak perlanggaran

Bagi menentukan tenaga resapan suatu kotak perlanggaran, ujian ke atas kotak perlanggaran dilakukan untuk memastikan kotak perlanggaran mampu menyerap tenaga resapan yang tinggi. Antara ujian yang sering dilakukan ialah bebanan kuasi-statik dan bebanan dinamik. Ujian bebanan kuasi-statik dilakukan bergantung kepada masa yang dikenakan ke atas model. Manakala, ujian bebanan dinamik, ia bergantung pada masa dan kesan inersia yang berlaku pada model kotak perlanggaran tersebut.

2.3.2.1 Ujian bebanan kuasi-statik

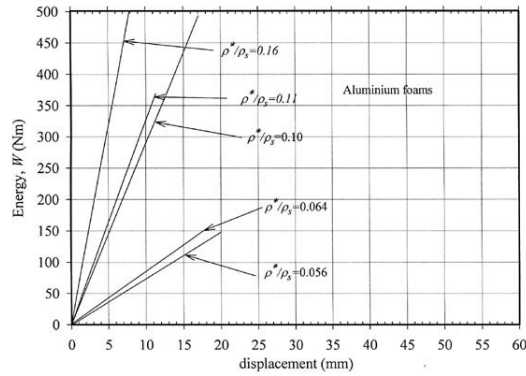
Liu et al (2012), mengkaji tenaga resapan pada tiub aluminium berisi buih untuk menentukan tegasan-terikan apabila ujian kuasi-statik dikenakan. Ujian dilakukan pada tiub adalah aloi Aluminium 6063 dengan diameter luar keratan adalah 30 mm dan ketebalan 1 mm. Ujian kuasi-statik telah dijalankan pada mesin ujian mekanikal CMT5105 dengan kadar 2 mm/min sehingga 70 % perubahan telah dicapai. Kadar terikan spesimen adalah 8.33×10^{-4} .

Berdasarkan keputusan ujian kuasi-statik yang dijalankan menunjukkan bahawa gabungan tiub-buih menyerap lebih tenaga daripada kuantiti buih dan tiub kerana interaksi antara tiub dan pengisi yang mengandungi geseran, penyemperitan, pembentukan retak dan pertumbuhan. Penyerapan tenaga per unit isipadu tiub berisi buih adalah kira-kira 6 kali buih sahaja pada tekanan 0.7. **Rajah 2.9** menunjukkan perubahan bentuk yang berlaku semasa ujian kuasi-statik dilakukan. Proses ubah bentuk buih aluminium mengandungi tiga langkah iaitu ubah bentuk elastik, ubah bentuk plastik dan mengucup.



Rajah 2.9: Ubah bentuk aluminium berisi buih (Liu et al, 2012)

Said et al (2008) telah melakukan kajian terhadap tindak balas buih aluminium apabila dimampatkan. Blok berbentuk kubus dipotong kepada lapan spesimen dikenakan bebanan kuasi-statik pada kadar 5 mm/min dan sisi setiap spesimen adalah 70 mm. Perbezaan ketumpatan aluminium memberi kesan kepada tegasan-terikan buih aluminium. Ketumpatan bahan yang tinggi mampu menyerap tenaga yang banyak. **Rajah 2.10** menunjukkan tenaga resapan melawan anjakan bagi eksperimen kuasi-statik buih aluminium.



Rajah 2.10: Tenaga resapan melawan anjakan (Said et al, 2008)

2.3.2.2 Ujian bebanan dinamik

Zarei et al (2010), dalam kajiannya mengenai ujian bebanan dinamik telah menjalankan ujian jatuh ke atas rig. Jisim yang dikenakan adalah 20 sehingga 300 kg. Tinggi maksimum jatuhnya beban adalah 8 m dengan halaju 12.5 ms^{-1} . Daya dan anjakan yang berlaku direkodkan.

Rajah 2.11 menunjukkan perubahan bentuk pada rig selepas ujian. Tiub mengalami perubahan bentuk pada bahagian sudut. Kesan perubahan bentuk bermula apabila fasa bebanan linear elastik dikenakan bebanan yang maksimum. Perubahan bentuk sudut bertambah apabila beban menuruni sehingga tiub terbelah kepada beberapa bahagian.

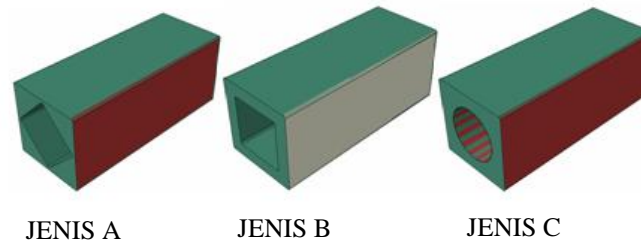


Rajah 2.11: Ubah bentuk pada tiub (Zarei et al, 2010)

2.3.3 Simulasi kotak perlanggaran

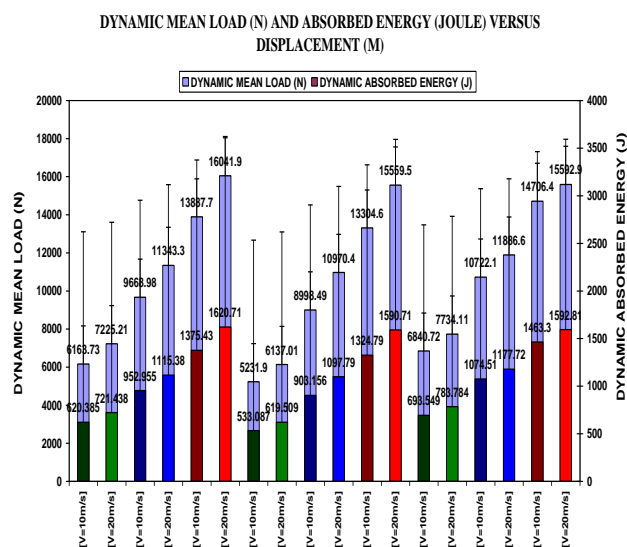
Basiran et al (2012), mengkaji mengenai tenaga resapan dinamik pada pelbagai keratan rentas aloi aluminium poliuretana berisi buih 2024-T4 dengan perisian ABAQUS. Dalam kajian ini, aloi aluminium dikenakan ujian bebanan dinamik untuk

mengenal pasti sifat-sifat kotak perlanggaran. **Rajah 2.12** menunjukkan model keratan rentas dengan bentuk berongga berbeza yang diuji.



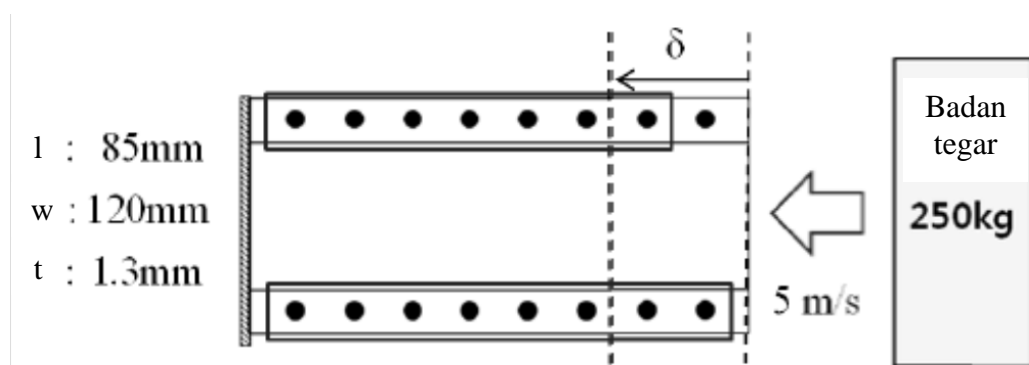
Rajah 2.12: Model geometri spesimen (Basiran et al, 2012)

Dalam hasil keputusan yang diperolehi menggunakan perisian ABAQUS, tenaga resapan dapat ditentukan. Perbezaan keratan rentas mempengaruhi kadar resapan tenaga. Berdasarkan jenis keratan rentas, keratan jenis C mampu menyerap tenaga yang baik dan mampu memberi prestasi yang terbaik. Walau bagaimanapun, untuk menghasilkan keratan jenis C, akan berlaku masalah pada kaedah pemasangan pada kenderaan. Ini mengelakkan berlaku kegagalan global. Justeru, pemilihan bentuk keratan rentas memainkan peranan penting dalam penghasilan kotak perlanggaran terbaik. **Rajah 2.13** menunjukkan perbandingan tenaga resapan mengikut keratan rentas jenis A, B dan C.



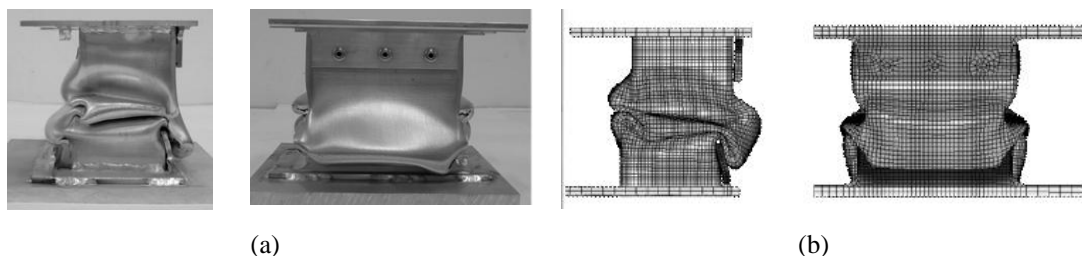
Rajah 2.13: Perbandingan penyerapan tenaga jenis A, B dan C (Basiran et al, 2012)

Simulasi pengoptimuman tempat kimpalan kaedah bebanan dinamik dan perbandingan keputusan simulasi dengan keputusan eksperimen bagi kotak perlanggaran menggunakan perisian *LS-DYNA 3D* telah dijalankan oleh Kim et al (2009) dan Kim et al (2008). Kaedah perlanggaran digunakan untuk mengoptimumkan kawasan kotak perlanggaran seperti dalam **Rajah 2.14**. Keputusan yang diperolehi dapat menentukan kawasan yang perlu dikimpal dan bilangan kimpalan untuk memastikan kotak perlanggaran mampu menyerap tenaga yang maksimum.

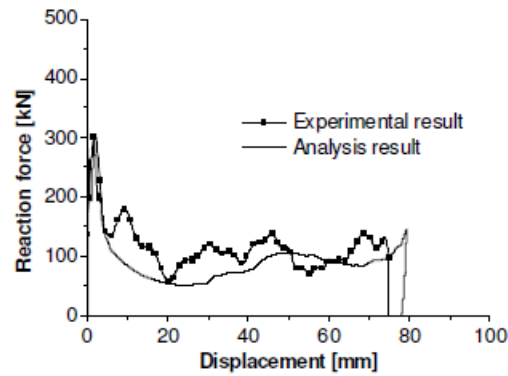


Rajah 2.14: Keadaan perlanggaran (Kim et al, 2009)

Perbandingan data eksperimen dengan simulasi melalui perisian ini menunjukkan keputusan yang hampir sama. Perubahan bentuk kotak perlanggaran daripada eksperimen dan simulasi dibandingkan seperti dalam **Rajah 2.15**. **Rajah 2.16** menunjukkan kesamaan bentuk antara simulasi dan eksperimen menghampiri dalam lengkung beban – anjakan.



Rajah 2.15: Ubah bentuk kotak perlanggaran: (a) eksperimen; (b) analisa unsur terhingga (Kim et al, 2008)



Rajah 2.16: Perbezaan keputusan eksperimen dan simulasi (Kim et al, 2008)

2.3.3.1 Sifat mekanikal bahan

Aluminium sering kali digunakan dalam pelbagai aplikasi kerana gabungan sifat-sifatnya yang unit. Aluminium sangat mudah untuk dikitar semula.

Lipksiet al (2012), telah melakukan kajian kesan suhu ke atas sifat kekuatan asas aloi aluminium 2024-T3. Ujian telah dijalankan pada lapan suhu yang berbeza dari 25 sehingga 200 °C. Suhu diukur secara langsung ke atas sampel yang dipanaskan sehingga suhu sampel stabil. Suhu dikekalkan selama 10 minit sebelum ujian dimulakan.

Hasil ujian tegasan yang dijalankan menunjukkan kekuatan bahan plat aluminium yang diuji pada suhu berbeza adalah berlainan. **Jadual 2.2** menunjukkan sifat-sifat kekuatan ditentukan berdasarkan ujian tegasan seragam

Jadual 2.2: Sifat-sifat kekuatan aloi aluminium 2024 T3 (Adam et al, 2012)

Arah	Suhu	E	R _{eL}	R _{p0.2}	R _m	A _t
	°C					
Selari arah putaran plat	25	68.563	367.5	-	488.8	23.9
	50	66.879	367.5	-	483.0	23.2
	75	70.403	361.8	-	471.1	23.4
	100	65.564	360.3	-	466.2	18.4
	125	62.863	354.0	-	440.7	16.5
	150	62.082	348.3	-	422.5	17.7
	175	66.814	318.2	-	394.2	19.1
	200	46.624	312.9	-	383.2	22.2

Jadual 2.2 (sambungan)

Arah	Suhu	E	R _{eL}	R _{p0.2}	R _m	A _t
	°C	MPa				%
Serenjang arah putaran plat	25	64.456	-	323.6	478.0	21.7
	50	65.674	-	320.4	470.9	24.1
	75	72.926	-	314.4	453.3	20.0
	100	65.965	-	307.4	449.3	21.8
	125	64.721	-	279.8	433.6	21.1
	150	60.858	-	305.7	414.9	19.4
	175	66.886	-	306.7	420.2	18.8
	200	53.675	-	270.0	367.7	23.4

Fujdaet al (2007), telah mengkaji kesan rawatan haba pada mikrostruktur dan sifat mekanik EN AW 2024 aloi aluminium selepas kaedah sepuhlindap dan selepas penuaan semula jadi. Eksperimen dilakukan ke atas rod bar berdiameter 10 mm aloi aluminium komersial EN AW 2024.

Hasil yang diperolehi daripada rawatan haba dan pelindapkejutan, analisa kekerasan aloi telah menurun antara julat 70.2 hingga 113.6 HV berbanding dengan nilai kekerasan keadaan awal iaitu 150 HV. Keputusan ujian tegangan yang diperolehi seperti dalam **Jadual 2.3**.

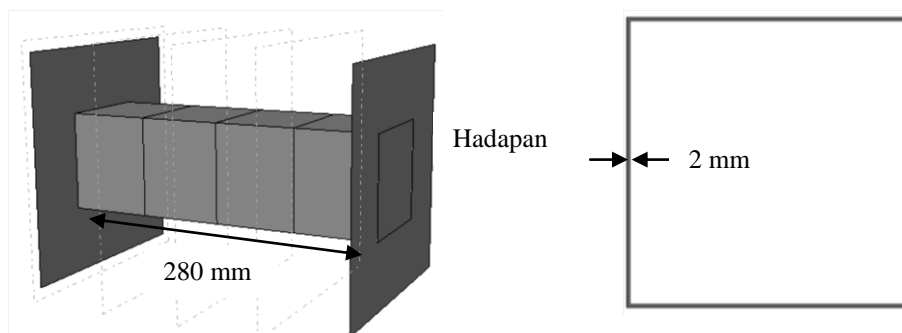
Jadual 2.3: Sifat-sifat mekanikal aluminium aloi EN 2024 T4 (Fujda et al, 2007)

Keadaan : suhu sepuhlindap (°C)	Permulaan	520	540	560
Kekuatan tegangan muktamad, σ_{ult} (MPa)	571	510	462	391
Tegasan alahan, σ_y (MPa)	464	259	237	209
Terikan untuk kegagalan (%)	14.1	16.1	19.3	25.8

2.4 Kajian terdahulu rekabentuk kotak perlanggaran fungsi bahan bergred aluminium

Jamian (2012) telah mengkaji rekabentuk kotak perlanggaran menggunakan lapisan demi lapisan atau *stepwise* bahan untuk menentukan kecerunan bahan. Perbezaan bentuk keratan rentas akan menghasilkan kecerunan bahan yang berbeza. Ujian kuasi-statik dan bebanan dinamik dilakukan untuk menentukan kesan bahan bergred terhadap penyerapan tenaga. Rekabentuk kotak perlanggaran adalah bulatan, segi

empat, pentagon dan heksagon. Ketinggian dan ketebalan rekabentuk kotak perlanggaran fungsi bahan bergred adalah seperti dalam **Rajah 2.17**.



Rajah 2.17: Tinggi dan tebal kotak perlanggaran (Jamian, 2012)

Fungsi bahan bergred aluminium dikenakan ujian kuasi-statik dan bebanan dinamik. Ujian mampatan kuasi-statik pada kotak perlanggaran dikenakan pada halaju 0.1 ms^{-1} . Manakala, ujian bebanan dinamik pada kotak perlanggaran pada halaju yang berbeza iaitu 15, 30 dan 45 km/j dengan beban 500 kg akan menghentam hadapan kotak perlanggaran.

Hasil yang diperolehi menunjukkan rekabentuk kotak perlanggaran menggunakan konsep lapisan demi lapisan mampu menyerap tenaga yang tinggi. Perbezaan kekuatan kecerunan lapisan akan menentukan jumlah tenaga yang diserap. Rekabentuk keratan rentas heksagon mampu menyerap tenaga yang banyak.

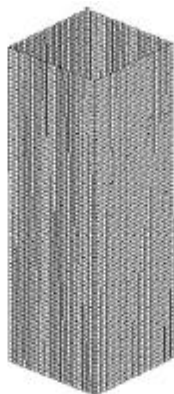
Sun et al (2010) mengkaji Fungsi Buih Bergred atau dikenali *Functional Graded Foam (FGF)* pada tiang persegi dinding nipis. Tiang dinding menggunakan bahan aloi aluminium. Model unsur terhingga bagi dinding nipis tiang persegi dipenuhi dengan fungsi buih bergred aluminium menggunakan perisian di LS DYNA. Teras buih dibahagikan kepada 20 lapisan di sepanjang paksi. Setiap lapisan mempunyai ketumpatan yang berbeza. Model 3D unsur terhingga ditunjukkan dalam **Rajah 2.18**.

Hasil keputusan yang diperolehi menunjukkan tiang berisi buih bergred mempunyai kotak perlanggaran lebih baik daripada tiang seragam yang dipenuhi buih dari segi tenaga resapan tentu ataupun *Specific Energy Absorption*, SEA dan daya tindak balas maksimum. Oleh itu, tiang berisi buih bergred merupakan komponen yang berpotensi dalam rekabentuk kotak perlanggaran terbaik. Walau

bagaimanapun, perubahan dalam fungsi kecerunan buih mempunyai kesan yang besar pada kotak perlanggaran tiang berisi FGF.



(a) Tiub berisi buih



(b) Tiub



(c) Berisi buih bergred

Rajah 2.18: Model 3D unsur terhingga tiang berisi buih bergred (Sun et al, 2010)

BAB 3

METODOLOGI

3.1. Pengenalan

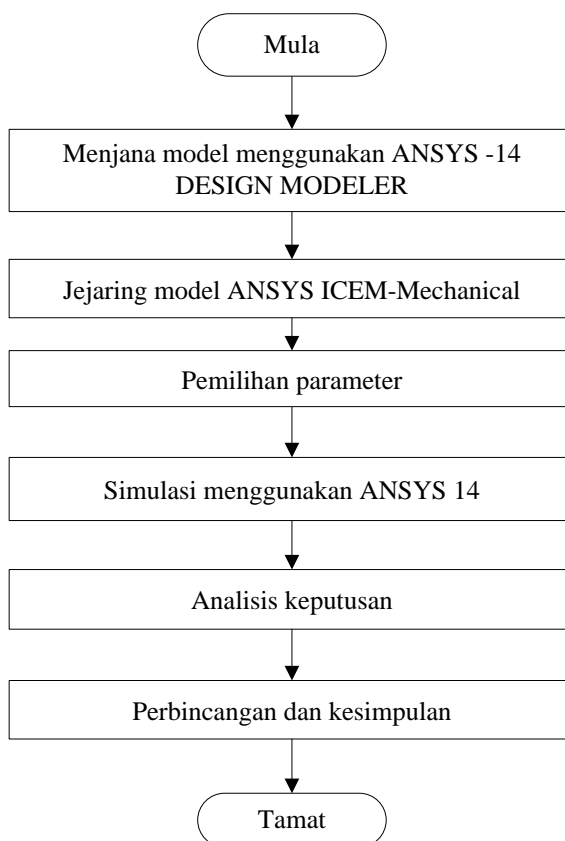
Carta alir kajian ini ditunjukkan oleh **Rajah 3.1**. Perancangan langkah-langkah kerja projek dilakukan dengan mematuhi pelan rancangan yang telah ditetapkan seperti yang dinyatakan dalam carta Gantt di **LAMPIRAN A**. Kajian terdahulu dirujuk untuk menentukan kaedah kajian dalam menyelesaikan masalah ini. Simulasi pembebanan kuasi-statik dan dinamik kotak perlanggaran dilakukan menggunakan perisian *ANSYS*. Terdahulu, sifat bahan kotak perlanggaran diramalkan berdasarkan taburan suhu melalui proses rawatan haba dan data eksperimen yang dijalankan oleh Fujda et al (2007).

3.2. Kaedah berangka

3.2.1. Pengkomputeran domain

Model direka mengikut kajian yang dilakukan oleh The National Crash Analysis Center (NCAC) (2011), menggunakan lukisan skematik dan perisian *ANSYS -Design Modeller* seperti dalam **Rajah 3.2** dan **Rajah 3.3**. Lukisan terperinci model adalah seperti di **LAMPIRAN B**. Rekabentuk dan geometri kotak perlanggaran adalah sama seperti mana yang dilakukan oleh Jamian (2012). **Jadual 3.3** menunjukkan taburan suhu pada model kotak perlanggaran. Dalam kajian ini, kotak perlanggaran fungsi bahan bergred berasaskan aluminium dihasilkan dengan memanaskan satu hujungnya menggunakan pemanas haba dan pada hujung yang satu lagi diletakkan aliran air

pada suhu bilik selama 4 jam seperti dalam **Rajah 3.2** dan **Rajah 3.3**. Selepas itu, kotak perlanggaran fungsi bahan bergred dikenakan ujian hentaman untuk menentukan tenaga resapan dan daya maksimum beban yang boleh dikenakan ke atas model tersebut. Hasil keputusan simulasi kotak perlanggaran rawatan haba dibandingkan dengan kotak perlanggaran tanpa rawatan haba. **Jadual 3.4** menunjukkan saiz jejaring yang digunakan pada model kotak perlanggaran. Pemilihan saiz jejaring bertujuan menentukan nod pada kotak perlanggaran tersebut.



Rajah 3.1: Carta aliran kajian

Jadual 3.1: Geometri model kotak perlanggaran

	Saiz model
Diameter (mm)	120
Panjang (mm)	84.853
Lebar (mm)	84.853
Tinggi (mm)	280
Tebal (mm)	2
Sudut (°)	45

Jadual 3.2: Parameter bahagian model

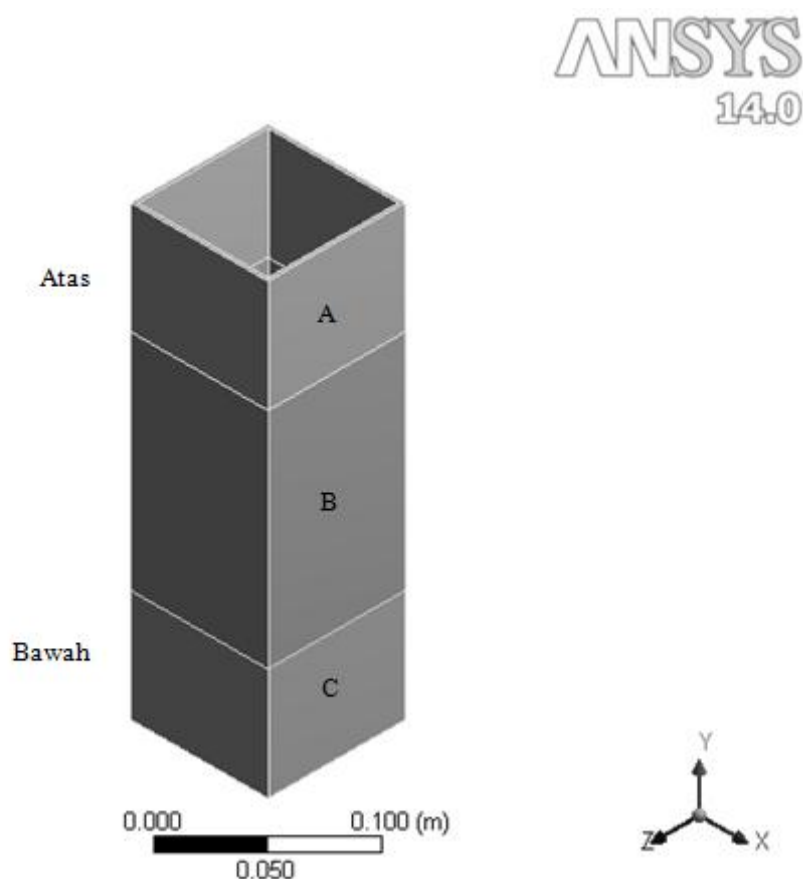
Segmen	A	B	C
Tinggi (mm)	70	140	70
Suhu awal (°C)	500	25	

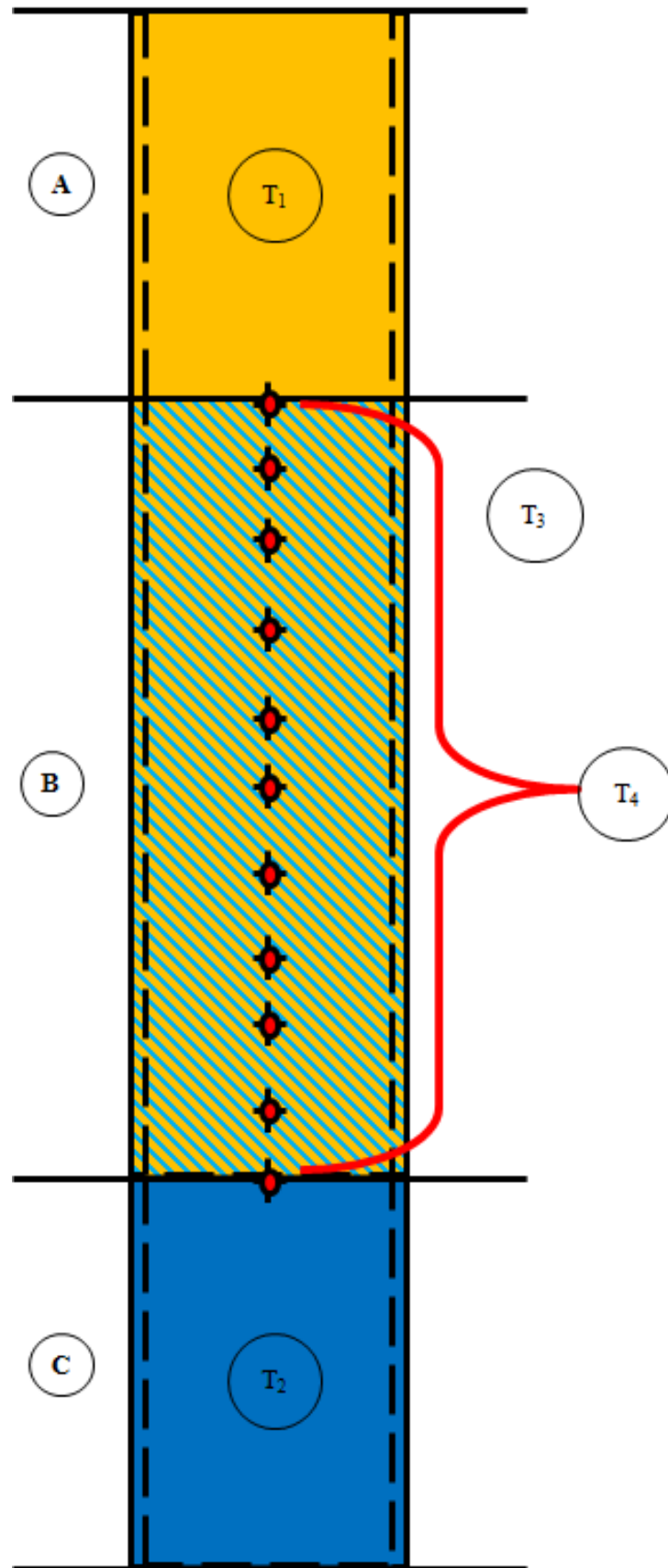
Jadual 3.3: Taburan suhu

Pemanas	T_1
Air	T_2
Persekitaran	T_3
Kecerunan suhu antara pemanas dan air	T_4

Jadual 3.4: Saiz jejaring model

Segmen	A	B	C
Saiz (m)	0.005		

**Rajah 3.2:** Model pengkomputeran



Rajah 3.3: Lukisan skematik model

RUJUKAN

- Basiran, M. F., Othman, A. & Sharif, S. M. (2012). *Finite element modelling of axial crushes on aluminium 2024-T4 alloy filled with polyurethane foam*. Politeknik Merlimau, Malaysia.
- El-Hadad, S., Sato, H., Miura-Fujiwara, E. & Watanabe, Y. (2010). Fabrication of Al-Al₃Ti/Ti₃Al Functionally Graded Materials under a Centrifugal Force. *Materials* 3, ms. 4639 – 4656.
- Fujda, M., Misicko, R., Rusnakova, L. & Sojko, M. (2007). Effect of Solution Annealing Temperature on Structure and Mechanical Properties of EN AW 2024 Aluminium Alloy. *Journal of Metals, Materials and Minerals*. Vol.17 No.1 pp.35– 40.
- Groves, J. F. & Wadley, H. N. G. (1997). Functionally graded materials synthesis via low vacuum directed vapor deposition. *Composites Part B 28B*, ms. 57 – 69.
- Jamian, S. (2012). *Application of Functionally Graded Materials for severe plastic deformation and smart materials-experimental study and finite element analysis*. Nagoya Institute of Technology: Tesis Ph.D.
- Kim, S. B., Huh, H., Lee, G. H., Yoo, J. S. & Lee, M. Y. (2008). Design of The Cross Section Shape of an Aluminum Crash Box for Crashworthiness Enhancement of a Car. *International Journal of Modern Physics B Vol. 22*, Nos. 31 & 32, 5578 – 5583.
- Kim, Y. J. & Huh, H. (2009). *Reliability based design optimization for crashworthiness of a spot welded hat type member*. 8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization.
- Knoppers, G. E., Gunnink, J. W., van den Hout, J. & van Vliet, W. P. (2004). *The Reality of Functionally Graded Material Products*. dlm. Pham, D. T., Eldukhri, E. E. & Soroka, A. J. *Intelligent Production Machines and Systems*. Elsevier Science & Technology.

- Lipksi,A. & Mrozinski,S. (2012). *The effects of temperature on the strength properties of aluminium alloy 2024-T3*. Acta mechanica et Automatica, vol6 no3, 62–66.
- Liu,H., Yao,G. & Cao,Z. (2012).Energy absorption of aluminium foam-filled tubes under quasi-static axial loading.dlm. Suarez, C. E. (Ed.). *Light Metals 2012*. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society).
- Mahamood,R. M., Akinlabi,E. T., Shukla,M. & Pityana,S. (2012). *Functionally Graded Material: An Overview*. Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol III WCE 2012, July 4 - 6, 2012, London, U.K.
- Nemat-Alla,M. M., Ata,M. H., Bayoumi,M. R. & Khair-Eldeen,W. (2011). Powder metallurgical fabrication and microstructural investigations of aluminum/steel functionally graded material. *Materials Sciences and Applications*, 2, 1708 – 1718.
- Nilsson,J. (2005). *European patent specification-Crash box for vehicle*. EP 1 765 642 B1.
- Peixinho,N., Soares,D., Vilarinho,C., Pereira,P. & Dimas,D. (2012). Experiemntal Study of Impact Energy Absorption in Aluminium Square Tubes with Thermal Tringgers. *Material Research 15 (2)*, ms. 323 – 332.
- Pham,D. T. & Dimov,S. S. (2001). *Rapid manufacturing: the technologies and applications of rapid prototyping and rapid tooling*. Springer.
- Said,M. R. & Tan,C. F. (2008). *The Response of Aluminium Foams Under Quasi-Static Loading*. Chiang Mai J. Sci. 35(2) : 241– 249.
- Schmitz,C., Domagala,J. & Haag,P. (2006). *Handbook of Aluminium Recycling*. Vulkan-Verlag. ms. 27.
- Shahrjerdi,A., Mustapha,F., Bayat,M., Sapuan,S. M. & Majid,D. L. A. (2011). Fabrication of functionally graded Hydroxyapatite-Titanium by applying optimal sintering procedure and powder metallurgy. *International Journal of the Physical Sciences Vol. 6(9)*, pp. 2258–2267.
- Sun,G., Li,G., Hou,S., Zhou,S., Li,W. & Li,Q. (2010). Crashworthiness design for functionally graded foam-filled thin-walled structures. *Materials Science and Engineering A 527*, 1911 – 1919.
- Sun,G.,Li,G., Zhou,S., Li,H., Hou,S.& Li,Q. (2011). Crashworthiness design of vehicle by using multiobjective robust optimization. *Struct Multidisc Optim 44*, ms. 99 – 110.

- Watanabe, Y. & Sato, H. (2011). Review Fabrication of Functionally Graded Materials under a Centrifugal Force. dlm. Cuppoletti, J. (Ed.) *Nanocomposites with Unique Properties and Applications in Medicine and Industry*. InTech.
- Zarei, H. & Kroeger, M. (2010). Crashworthiness investigation and optimization of empty and foam filled composite crash box. dlm. Dubrovski, P. D. (Ed.). *Woven Fabric Engineering*. InTech.