

TESIS

**APLIKASI PENAMBAHAN *ALUMINIUM FOAM*
PADA STRUKTUR *CRASH BOX* RANGKA MOBIL LISTRIK**

*The Application of Adding Aluminum Foam into the Crash Box
Structure on Electric Vehicle's Frame*

**MUH. MA'RUF R. JAHUDDIN
D022201001**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

PENGAJUAN TESIS

**APLIKASI PENAMBAHAN *ALUMINIUM FOAM*
PADA STRUKTUR *CRASH BOX* RANGKA MOBIL LISTRIK**

Tesis
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

**MUH. MA'RUF R. JAHUDDIN
D022201001**

Kepada

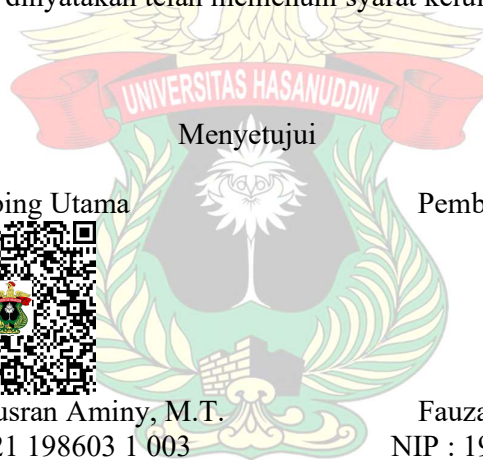
**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

TESIS

APLIKASI PENAMBAHAN *ALUMINIUM FOAM* PADA STRUKTUR *CRASH BOX* RANGKA MOBIL LISTRIK

**MUH. MA'RUF R. JAHUDDIN
D022201001**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 14 Maret 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan



Pembimbing Utama



Dr. Ir. Ahmad Yusran Aminy, M.T.
NIP : 19580921 198603 1 003

Pembimbing Pendamping



Fauzan, S.T., M.T., Ph.D.
NIP : 19770103 200801 1 009

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof.Dr.Eng.Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T.,M.T.
NIP : 19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi
S2 Teknik Mesin



Dr.Eng. Novriany Amaliyah, S.T.,M.T.
NIP : 19791112 200812 2 002

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Muh. Ma'ruf R. Jahuddin
Nomor mahasiswa : D022201001
Program studi : Teknik Mesin

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Aplikasi Penambahan *Aluminium Foam* pada Struktur *Crash Box* Rangka Mobil Listrik” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Dr. Ir. Ahmad Yusran Aminy, M.T. sebagai Pembimbing Utama dan Fauzan, S.T., M.T., Ph.D. sebagai Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah disetujui dalam Jurnal *Key Engineering Material* Volume 939 – 972, ISSN: 1662-9795 sebagai artikel dengan judul “*Quasi-static Loading Analysis of Foam Filled Wide Cross Section Structure using Finite Element Method*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 14 Maret 2023

Yang menyatakan



Muh. Ma'ruf R. Jahuddin

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah, Tuhan yang Maha Esa, yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini.

Ucapan terima kasih yang tak terhingga penulis sampaikan kepada Bapak Dr. Ir. Ahmad Yusran Aminy, MT. selaku pemimbing utama dan Bapak Fauzan, ST., MT., Ph.D. selaku pembimbing pendamping, yang penuh ketulusan meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan dan membimbing penulis dalam menyelesaikan tesis ini.

Penelitian ini juga tidak lepas dari bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak, untuk itu izinkan penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Ilyas Renreng sebagai Penguji Pertama, Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT. sebagai Penguji Kedua, dan Bapak Dr. Hairul Arsyad, ST., MT. sebagai Penguji Ketiga atas masukan dan arahannya selama penelitian ini dilaksanakan.
2. Bapak Rektor Universitas Hasanuddin dan Bapak Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi penulis menempuh program Magister serta para dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian.
3. Ibu Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST., MT. sebagai Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin yang telah memfasilitasi kami dengan baik sehingga penyelesaian tesis ini dapat terlaksana dengan tertib.
4. Kepada Kementerian Pendidikan Republik Indonesia, penulis mengucapkan terima kasih atas pemberian Beasiswa Unggulan selama menempuh program magister.

Melalui tesis ini perkenankan penulis menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang sebesar-besarnya untuk kedua orang tua tercinta, Ayahanda Dr. Ir. Rahmat Jahuddin, MP. dan Ibunda Ir. Hasmiah Hamid, MP., yang selama ini menyayangi, mendidik, membesarkan penulis dengan penuh kasih dan hati yang tulus, serta dukungan secara moril dan materi selama penulis menuntut ilmu. Kepada saudara dan saudari (dr. Nur Haerat R. Jahuddin, Resky Wulandari R.

Jahuddin, dan Muhammad Fahri R. Jahuddin) yang selalu perhatian dan memberikan motivasi kepada penulis agar terus berjuang.

Tesis ini disusun dengan keterbatasan penulis sebagai manusia biasa, oleh karena itu dengan penuh kerendahan hati penulis mengharapkan kritik membangun dan saran dari semua pihak. Akhir kata, penulis berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi kita semua dan semoga apa yang penulis kerjakan mendapat ridha dari Allah *Subhanahu Wata'ala*, Amin.

Gowa, 14 Maret 2023

Penulis

Muh. Ma'ruf R. Jahuddin

ABSTRAK

MUH. MA'RUF R. JAHUDDIN. *Aplikasi Penambahan Aluminium Foam pada Struktur Crash Box Rangka Mobil Listrik* (dibimbing oleh **Ahmad Yusran Aminy, Fauzan**)

Penggunaan material ringan sebagai komponen mobil listrik dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi. Komponen keselamatan adalah bagian yang mesti mendapat perhatian khusus karena komponen ini harus berfungsi secara maksimal meskipun terbuat dari material ringan. *Crash box* adalah komponen keselamatan yang berfungsi sebagai peredam tumbukan frontal. Umumnya *crash box* berbentuk silinder baja dan dipasang di antara rangka dan fender mobil. Aluminium adalah material ringan yang tegangan spesifiknya lebih tinggi dibandingkan baja. Sedangkan dalam bentuk busa, *aluminium foam* dapat digunakan sebagai material penyerap energi tumbukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menentukan desain penampang *crash box* aluminium yang optimal dalam menyerap energi tumbukan melalui uji tekan quasi-statik. Pada penelitian ini, *crash box* tersusun atas pelat aluminium 3 mm bertipe AL6061-T6 dengan pengisi *aluminium foam* berpori tertutup dengan diameter pori 8 mm. Terdapat 2 faktor variasi yang diterapkan, yaitu 6 variasi penampang *aluminium foam* dan 4 variasi sudut penekanan quasi statik. 6 variasi penampang memiliki massa dan volume yang sama kemudian diuji pada 4 variasi sudut penekanan, yaitu 0°, 10°, 20°, dan 30°. Data parameter *crashworthiness* diperoleh dari simulasi uji quasi-statik program Abaqus CAE. Data simulasi kemudian divalidasi dengan uji tekan laboratorium untuk diamati kesesuaiannya dengan data eksperimen. Setelah valid, data simulasi diolah menggunakan metode Taguchi dan *Principal Component Analysis* untuk diperoleh desain penampang *crash box* yang optimal. Hasil menunjukkan bahwa desain CBF4 memiliki kemampuan penyerapan energi yang terbaik. Nilai parameter *crashworthiness* CBF4 di antaranya adalah massa yang tertekan (DM) bernilai 0,334 kg, jarak penekanan (DISP) bernilai 56,519 mm, beban puncak (FPEAK) bernilai 67,390 kN, energi total yang terserap (TEA) bernilai 1,423 kJ, energi spesifik yang terserap (SEA) bernilai 4,262 kJ/kg, gaya tekan rata-rata (FMEAN) bernilai 25,170 kN, dan efisiensi beban tumbukan (CFE) bernilai 37,349%. Sehingga, meskipun massa dan volumenya sama, desain penampang *crash box* mempengaruhi kemampuan penyerapan energi tumbukan.

Kata kunci: *crash box* aluminium, *crashworthiness*, metode Taguchi, *principal component analysis*, simulasi quasi-statik

ABSTRACT

MUH. MA'RUF R. JAHUDDIN. *The Application of Adding Aluminium Foam into the Crash Box Structure on Electric Vehicle's Frame* (supervised by **Ahmad Yusran Aminy, Fauzan**)

The utilization lightweight material in electric vehicle could increase the efficiency of vehicle's energy consumption. The safety component of electric vehicle should work at maximum capacity even though it is fabricated from lightweight material. Crash box is a safety component that functioned as a frontal collision damper. A conventional crash box is a hollow cylindrical metal installed between the vehicle's frame and the bumper. Aluminium is a lightweight material which has specific strength greater than metal. As well as in foam shape, the aluminium foam could be utilized to absorb the impact energy. Therefore, this study aimed to obtain an optimal design of an aluminium crash box filled with aluminium foam by using quasi-static analysis. In this study, crash box is constructed from a 3 mm AL6061-T6 sheet and filled with an 8 mm pore diameter of closed-cell aluminium foam. There are two variation factors applied which are 6 cross-section designs of crash box with the same mass and volume and 4 directions of quasi-static loading specifically 0°, 10°, 20°, and 30°. The crashworthiness parameters are obtained from quasi-static simulation using Abaqus CAE. Furthermore, the parameter is validated through laboratory tests to observe its conformity with the true compression test. Subsequently, all the parameters would be analyzed by utilizing the Taguchi method and the Principal Component Analysis in exchange for the optimum crash box design. The result showed that CBF4 has the best energy-absorbing ability. All values of CBF4 crashworthiness parameters are 0.334 kg of displaced mass, 56,519 mm of displacement, 67.390 of peak load, 1.423 kJ of total energy absorption, 4.262 kJ/kg of specific energy absorption, 25.170 kN of average crush force, and 37.349% of crush force efficiency. In conclusion, even though the mass and volume are the same, the crash box cross-section design affects the energy-absorbing ability.

Keywords: aluminium crash box, crashworthiness, principal component analysis, quasi-static simulation, Taguchi method

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PENGAJUAN TESIS	ii
PERSETUJUAN TESIS	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	5
1.3. Tujuan	5
1.4. Batasan Masalah	5
1.5. Manfaat	6
BAB II LANDASAN TEORI	7
2.1. Crash box	7
2.2. Crashworthiness	9
2.3. Quasi-static Loading	12
2.4. Aluminum Foam	14
2.5. Metode Elemen Hingga (MEH)	17
2.5.1. Defenisi MEH	17
2.5.2. Penerapan MEH	18
2.6. Proses Optimasi	19
2.6.1. Metode Optimasi Taguchi	19
2.6.2. Principal Component Analysis (PCA)	21

BAB III	METODE PENELITIAN	26
3.1.	Diagram Alir	26
3.2.	Alat dan Bahan	27
3.2.1.	Alat	27
3.2.2.	Bahan	28
3.3.	Tahapan	32
3.4.	Waktu dan Tempat	33
BAB IV	HASIL & PEMBAHASAN	34
4.1.	Karakterisasi Material	34
4.1.1.	Uji Tarik AL 6061 T6	34
4.1.2.	Uji Tekan Aluminium foam	36
4.2.	Desain Crashbox	37
4.3.	Proses Simulasi	39
4.3.1.	Validasi Quasi-statik	39
4.3.2.	Tahapan Simulasi	42
4.4.	Hasil Simulasi	52
4.5.1.	Deformasi Spesimen	52
4.5.2.	Parameter Crashworthiness	57
4.5.	Proses Eksperimen Uji Tekan	71
4.6.1.	Parameter Crashworthiness Eksperimen	72
4.6.2.	Validasi Simulasi terhadap Eksperimen	73
4.6.	Optimasi Taguchi dan PCA	75
BAB V	PENUTUP	81
5.1.	Kesimpulan	81
5.2.	Saran	82
	DAFTAR PUSTAKA	83
	LAMPIRAN	86

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Klasifikasi geometri crash-box	8
Tabel 2.2. Desain OA pada metode Taguchi	21
Tabel 3.1. Dimensi spesimen uji tekan	29
Tabel 3.2. Dimensi spesimen uji tarik	30
Tabel 4.1. Karakteristik AL 6061 T6 sesungguhnya	35
Tabel 4.2. Karakteristik aluminium foam sesungguhnya	36
Tabel 4.3. Perbandingan deformasi CBHOL dengan CBFF.....	34
Tabel 4.4. Skema kontur tegangan von Mises dan potongan penampang spesimen tumbukan 0 derajat	53
Tabel 4.5. Skema kontur tegangan von Mises dan potongan penampang spesimen tumbukan 10 derajat	54
Tabel 4.6. Skema kontur tegangan von Mises dan potongan penampang spesimen tumbukan 20 derajat	55
Tabel 4.7. Skema kontur tegangan von Mises dan potongan penampang spesimen tumbukan 30 derajat	56
Tabel 4.8. Jarak penekanan setiap spesimen	60
Tabel 4.9. Besar massa yang tertekan setiap spesimen	61
Tabel 4.10. Nilai beban puncak setiap spesimen	63
Tabel 4.11. Total energi terserap setiap spesimen	65
Tabel 4.12. Serapan energi spesifik setiap spesimen	67
Tabel 4.13. Gaya rata-rata setiap spesimen	68
Tabel 4.14. Efisiensi gaya tumbukan setiap spesimen	69
Tabel 4.15. Rangkuman parameter CW setiap spesimen pada semua variasi sudut penekanan	70
Tabel 4.16. Parameter CW pada spesimen eksperimen uji tekan	72
Tabel 4.17. Perbandingan parameter CW hasil simulasi & eksperimen	75
Tabel 4.18. Konstanta PCA untuk tumbukan tegak lurus	75
Tabel 4.19. Nilai MRPI untuk tumbukan tegak lurus	76
Tabel 4.20. Desain OA Taguchi pada variasi tumbukan miring	77
Tabel 4.21. Konstanta PCA untuk tumbukan miring	78

Tabel 4.22. Nilai MRPI untuk tumbukan miring	78
Tabel 4.23. ANOVA desain eksperimen tumbukan miring	79
Tabel 4.24. Rangkuman parameter CW spesimen CBF4	80

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Ilustrasi uji tabrak pada mobil	2
Gambar 1.2. Grafik presentasi lokasi tabrakan pada mobil	3
Gambar 1.3. Diagram faktor yang mempengaruhi penyerapan energi	4
Gambar 2.1. Posisi crash-box pada rangka mobil.....	7
Gambar 2.2. Skema kurva gaya terhadap perpindahan.....	10
Gambar 2.3. Bentuk umum kurva gaya terhadap perpindahan.....	11
Gambar 2.4. Perbandingan data uji quasi statik dan uji dinamik.....	13
Gambar 2.5. Perbandingan deformasi spesimen pada (a) uji impak dan (b) uji quasi statik	13
Gambar 2.6. Kurva keseimbangan energi pada uji quasi statik dengan variasi kecepatan (a) 3 m/s, (b) 30 m/s, dan (c) 150 m/s	14
Gambar 2.7. Struktur pori closed-cell metal foam.....	15
Gambar 2.8. Struktur pori open-cell metal foam	16
Gambar 2.9. Aproksimasi solusi keseluruhan diperoleh dari penggabungan solusi-solusi elemen.....	17
Gambar 2.10.(a) Mesh metode perbedaan hingga, (b) elemen segitiga, dan (c) elemen segiempat.....	19
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.....	26
Gambar 3.2. Alat uji tekan.....	27
Gambar 3.3. Alat uji tarik	27
Gambar 3.4. Logo program Simulia Abaqus dan SolidWorks	28
Gambar 3.5. Logo program Minitab dan Microsoft Excel	28
Gambar 3.6. (a) Skema standar ISO 13314:2011(E) dan (b) Spesimen aluminium foam.....	29
Gambar 3.7. (a) Skema standar ASTM E8/E8M-16a dan (b) Spesimen uji tarik AL 6061 T6.....	30
Gambar 3.8. (a) Dimensi crash box dan (b) Skema spesimen crash box dengan pengisi aluminium foam	31
Gambar 3.9. Variasi dan pengkodean spesimen crash box.....	31
Gambar 3.10. Arah penekanan quasi statik (a) 0°, (b) 10°, (c) 20°, dan (d) 30° .	32

Gambar 4.1. Kurva tegangan regangan hasil uji tarik AL 6061 T6	34
Gambar 4.2. Perbandingan antara kurva tegangan-regangan perhitungan dengan tegangan-regangan sesungguhnya	35
Gambar 4.3. Kurva tegangan-regangan plastis AL 6061 T6	36
Gambar 4.4. Kurva tegangan-regangan kompresi material aluminium foam ...	36
Gambar 4.5. Perbandingan antara kurva tegangan-regangan kompresi dengan tegangan-regangan sesungguhnya	37
Gambar 4.6. Crash box mobil listrik Hyundai	38
Gambar 4.7. Perbandingan kurva gaya perpindahan untuk CB kosong dengan CB yang terisi aluminium foam.....	39
Gambar 4.8. Bentuk deformasi CB untuk setiap mode getaran	40
Gambar 4.9. Kurva kesetimbangan antara energi internal dan energi kinetik spesimen	41
Gambar 4.10. Tampilan tahap part	42
Gambar 4.11. Tahap property (a) input data AL6061 T6 (b) input data aluminium foam	44
Gambar 4.12. Penentuan massa bagian dasar dan penekan	44
Gambar 4.13. Tahap assembly, (a) bentuk komponen uji kuasi statik (b) gambar potong bidang komponen	44
Gambar 4.14. Tampilah tahapan step.....	45
Gambar 4.15. Pengaturan interval pada (a) field output respond (b) history output respond	46
Gambar 4.16. Pengaturan tipe constraint antara permukaan dasar dengan CB ..	47
Gambar 4.17. Pengaturan koefisien gesek permukaan spesimen	47
Gambar 4.18. (a) Jenis-jenis interaksi antar permukaan pada spesimen, (b) Pengaturan permukaan yang saling bersentuhan	48
Gambar 4.19. Syarat batas komponen dasar spesimen	48
Gambar 4.20. Syarat batas komponen penekan spesimen	49
Gambar 4.21. (a) Tampak isometri CBF1 (b) tampak isometri potong penampang CBF1	49
Gambar 4.22. Susunan proses simulasi spesimen.....	50
Gambar 4.23. Status proses simulasi ketika sedang berlangsung	50

Gambar 4.24. Bentuk deformasi dan kontur tegangan tampak depan	51
Gambar 4.25. Bentuk deformasi (a) tampak depan, (b) potongan penampang .	51
Gambar 4.26. (a) Kurva energi internal dan energi kinetik terhadap waktu, (b) Kurva gaya reaksi dan jarak perpindahan impaktor terhadap waktu.....	52
Gambar 4.27. Perbandingan kurva gaya-perpindahan raw data dengan kurva dengan faktor damping	57
Gambar 4.28. Perbandingan kurva gaya-perpindahan pada variasi tumbukan (a) 0 derajat, (b) 10 derajat, (c) 20 derajat, dan (d) 30 derajat	59
Gambar 4.29. Skema definisi jarak penekanan.....	60
Gambar 4.30. Skema definisi beban puncak.....	62
Gambar 4.31. Skema definisi beban puncak pada tumbukan miring.....	63
Gambar 4.32. Grafik perbandingan TEA pada setiap sudut penekanan	65
Gambar 4.33. Grafik perbandingan SEA pada setiap sudut penekanan	67
Gambar 4.34. Grafik perbandingan FMEAN pada setiap sudut penekanan	68
Gambar 4.35. Grafik perbandingan CFE pada setiap sudut penekanan	69
Gambar 4.36. Tampak atas penampang spesimen (a) simulasi dan (b) eksperimen. Tampak isometri spesimen (c) simulasi dan (d) eksperimen	71
Gambar 4.37. Kurva gaya-perpindahan berdasarakan data eksperimen	72
Gambar 4.38. Perbandingan kondisi awal penekanan	73
Gambar 4.39. Perbandingan (a) deformasi simulasi dan (b) deformasi eksperimen.....	74
Gambar 4.39. Perbandingan kurva gaya-perpindahan antara data simulasi dan eksperimen.....	74
Gambar 4.40. Grafik MRPI tumbukan tegak lurus.....	76
Gambar 4.41. Nilai SN ratio tumbukan miring dengan variasi model dan sudut	80

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil uji tarik AL 6061 T6	86
Lampiran 2. Hasil uji tekan eksperimen <i>crash box</i>	86
Lampiran 3. Proses karakterisasi material	90
Lampiran 4. Proses pembuatan spesimen	90
Lampiran 5. Proses simulasi pembebanan	91

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada era globalisasi, kebutuhan terhadap alat transportasi semakin banyak, baik kendaraan roda dua maupun kendaraan roda empat. Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang cepat membuat produsen kendaraan, terutama dalam jenis mobil, berlomba-lomba menciptakan produk baru yang canggih, aman, ergonomis, dan murah. Namun di saat kebutuhan terhadap alat transportasi meningkat, dunia industri dihadapkan pada dua isu global yang sangat penting, yaitu permasalahan energi dan lingkungan.

Sejak Indonesia menjadi importir bahan bakar minyak, isu energi selalu menghiiasi media informasi setiap tahun. Berita yang disampaikan pun tidak lepas dari kenaikan harga BBM, pengurangan subsidi, atau kelangkaan BBM. Di tahun 2022, pemerintah harus menaikkan anggaran subsidi dan kompensasi BBM menjadi Rp 502 Triliun. Begitu pula dengan isu lingkungan yang selalu dijumpai di media informasi saat ini. Kota-kota besar semakin sesak dan memiliki kualitas udara yang semakin memburuk. Tentu saja hal itu akan menimbulkan permasalahan baru, misalnya masalah kesehatan masyarakat dan bencana industri, yang akan membebani negara di kemudian hari. Sehingga diperlukan sebuah solusi bagi industri transportasi untuk dapat mengatasi dua isu tersebut.

Pada sejarahnya, mobil listrik lahir bersamaan dengan mobil motor bakar di akhir abad 19. Hanya saja, pengembangan mobil listrik mengalami kendala karena riset yang dilakukan pada mobil listrik tidak menghasilkan produk yang memadai, terutama di bagian baterai. Sementara riset di bidang mobil motor bakar sangat pesat perkembangannya ditandai dengan banyaknya industri yang lahir di bidang mobil motor bakar. Sehingga tidak dapat dipungkiri, teknologi mobil motor bakar saat ini sangat tinggi karena sudah berkembang selama seratus tahun lebih. Namun tetap saja mobil motor bakar memiliki masalah di bidang energi dan lingkungan yang dampaknya pelan tapi terus meningkat.

Di era sekarang, riset baterai dengan kemampuan penyimpanan daya besar semakin baik. Begitu juga riset di bidang kecepatan penyimpanan daya (*fast*

charging) juga semakin baik. Sehingga kendala yang dihadapi mobil listrik di awal kemunculannya semakin dapat teratasi. Hal tersebut ditandai dengan masuknya produsen kendaraan ternama ke dalam industri mobil listrik.

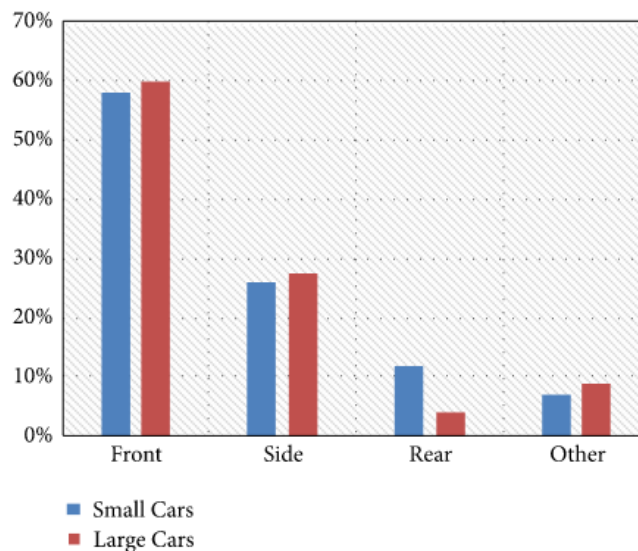
Perkembangan teknologi dalam industri otomotif tidak lepas dari faktor keamanan pada kendaraan. Rekayasa keselamatan berkendara meliputi penelitian maupun penerapan desain, konstruksi, perangkat, dan/atau peraturan yang meminimalisir sebab dan akibat kecelakaan lalu lintas (Seshadri, 2016). Menurut *World Health Organization* (WHO), 80% mobil yang terjual di seluruh dunia (mayoritas di negara berkembang) tidak memenuhi standar keselamatan utama dan hanya ada 40 negara yang menerapkan secara utuh 7 (tujuh) aturan terpenting dalam keselamatan berkendara (Sauber-Schatz, 2020). Tujuh aturan ini meliputi: (1) mobil mampu menahan benturan dari depan maupun samping, (2) kontrol kestabilan elektronik, (3) fasilitas pengaman untuk pejalan kaki, (4) penggunaan sabuk pengaman, (5) standar keamanan penumpang anak-anak, (6) perangkat *anti-lock braking system* (ABS), dan (7) menyalakan lampu di siang hari bagi kendaraan roda dua. Berkaitan dengan aturan tersebut, penelitian ini berfokus pada aturan pertama, yaitu standar pada benturan depan dan samping untuk melindungi penumpang dan memastikan bahwa mobil tahan terhadap benturan dari arah depan atau samping saat diuji pada kecepatan tertentu.



Gambar 1.1. Ilustrasi uji tabrak pada mobil (www.latinncap.com)

Di Indonesia, selama periode Januari – Oktober 2020, Korlantas Polri mencatat jumlah kecelakaan lalu lintas mencapai 83.715 kejadian. Secara lebih rinci, pada periode tersebut jumlah korban jiwa mencapai 19.320 jiwa, luka berat 8.995 orang, dan luka ringan 95.134 orang. Jika ditotal, seluruh kecelakaan telah menciptakan kerugian material mencapai Rp 163.338.918.003 (Dananjaya, 2020). Lebih lanjut, kendaraan mobil yang mengalami kecelakaan berjumlah 13.770 unit.

Faktor penyebab kecelakaan lalu lintas adalah 61% oleh faktor manusia, 9% oleh faktor kendaraan, dan 30% oleh faktor prasarana dan lingkungan. Meski penyebab kecelakaan ini bervariasi, akibat kecelakaan tetap berujung pada kerusakan kendaraan dan kerugian penumpang. Efek kerusakan ini dapat diminimalisir dengan menerapkan sistem keamanan yang baik pada kendaraan. Secara statistik, 60% kecelakaan terjadi pada bagian depan (frontal) kendaraan (Kurebwa & Mushiri, 2019). Oleh karena itu, dibutuhkan komponen keselamatan yang melindungi sisi frontal ini.

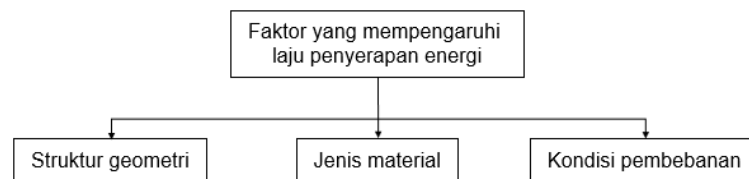


Gambar 1.2. Grafik persentasi lokasi tabrakan pada mobil (Kurebwa & Mushiri, 2019)

Crash box mempunyai peranan yang sangat penting untuk melindungi penumpang dari tabrakan frontal. Beberapa penelitian sebelumnya telah meneliti karakteristik *crash box* dalam menerima tumbukan. Nasir Hussain et al., (2020) melakukan simulasi tumbukan *crash box* yang terbuat dari material komposit GFRP (*glass fiber reinforced plastic*) dengan variasi bentuk penampang dan cekukan pada struktur *crash box*. Variasi penampang yang digunakan, yaitu persegi, melingkar, segi-enam, dan segi-sepuluh. Menggunakan prosedur uji impact berkecepatan rendah (15 km/jam), diperoleh kesimpulan bahwa struktur segi-sepuluh (*decagonal*) tanpa cekukan memiliki SEA (*specific energy absorption*) yang paling efektif di antara variasi lainnya. Ciampaglia et al., (2021) menggunakan CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*) sebagai material *crash box* dengan struktur geometri origami. Pengujian benda dilakukan dengan metode *quasi-static*

compression dengan variasi ukuran geometri origami benda. Berdasarkan kurva gaya-perpindahan dan mekanisme kerusakan, peneliti melakukan optimasi ukuran geometri benda sehingga diperoleh struktur yang paling optimal. Penelitian dengan konsep origami dan *quasi-static* juga dilakukan oleh Yuan et al., (2019) dengan berbagai jenis geometri lipat. *Crash box* dibentuk dari lembaran material logam sehingga membentuk *thin-wall structure*. Dengan berbagai variasi geometri tersebut, ditemukan rasio lipat origami yang optimal untuk penyerapan energi spesifik yang maksimal.

Sementara itu, material *hybrid carbon/aramid* digunakan oleh Quanjin et al., (2020) sebagai material penyusun *crash box*. Dengan tinjauan hasil penyerapan energi rata-rata, penyerapan energi spesifik rata-rata (SEA), *crash peak load*, modulus tekan rata-rata, dan tegangan maksimum rata-rata, benda dengan material hybrid ini terbukti memiliki karakteristik yang lebih baik dibanding *crash box* konvensional. Kaczyński et al., (2019) menggunakan material ringan magnesium alloy sebagai material dinding tipis disertai *aluminium foam* sebagai pengisinya. Dengan variasi sambungan las pengikat *crash box* dan cekukan pada dinding benda, pengujian dilakukan dengan metode pembebanan statik dan dinamis. Hasil menunjukkan bahwa struktur yang berisi *aluminium foam* memiliki SEA yang lebih tinggi. Cekukan pada dinding mengurangi tingkat penyerapan energi namun dengan cekukan ini mekanisme penyerapan energi lebih terkendali.



Gambar 1.3. Diagram faktor yang mempengaruhi penyerapan energi (Abdullah et al., 2020)

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, penyerapan energi tumbukan oleh *crash box* dipengaruhi oleh 3 (tiga) faktor utama, yaitu (1) struktur geometrinya, (2) material penyusunnya, dan (3) kondisi pembebanannya. Oleh karena itu pada penelitian ini, akan dilakukan analisis *crashworthiness* terhadap desain *crash box* yang dibangun dengan memvariasikan struktur geometri, material penyusunnya, dan kondisi pembebanannya. Sehingga penelitian ini dipilih material *aluminium alloy* sebagai dinding tipis *crash box* dengan pengisi *aluminum foam*

serta uji quasi statik tegak lurus dan miring pada variasi pembebanannya. Dengan variasi tersebut diharapkan desain penampang *crash box* yang efisien dalam menyerap energi tumbukan dapat diketahui.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini, antara lain:

- a. Berdasarkan simulasi, apa hasil yang diperoleh dalam analisis pengaruh aplikasi *aluminium foam* pada *crash box* mobil listrik?
- b. Sebagai validasi, apakah hasil simulasi tersebut berkesesuaian dengan hasil eksperimen penggunaan *aluminium foam*?
- c. Apakah desain *crash box* yang dibangun, secara optimal dapat menyerap energi lebih baik dibanding desain *crash box* sebelumnya?

1.3. Tujuan

Beberapa tujuan yang akan dicapai pada penelitian ini adalah:

- a. Menganalisis hasil simulasi pengaruh aplikasi *aluminium foam* pada *crash box* rangka mobil listrik.
- b. Menjelaskan perbandingan hasil simulasi dengan hasil eksperimen terhadap aplikasi *aluminium foam*.
- c. Memperoleh desain *crash box* yang memiliki daya serap energi lebih baik.

1.4. Batasan Masalah

Agar hasil yang diperoleh konvergen, maka perlu diberikan batasan mengenai metode dan pembahasan yang akan dipaparkan pada penelitian ini.

Batasan tersebut antara lain

- a. Aluminium yang digunakan bertipe Aluminium 6061-T6
- b. Benda uji dianggap isotropik
- c. Abaqus CAE digunakan sebagai program simulasi tumbukan
- d. Quasi-static Loading adalah jenis pembebanan yang diaplikasikan
- e. Minitab adalah program yang digunakan pada proses optimasi

1.5. Manfaat

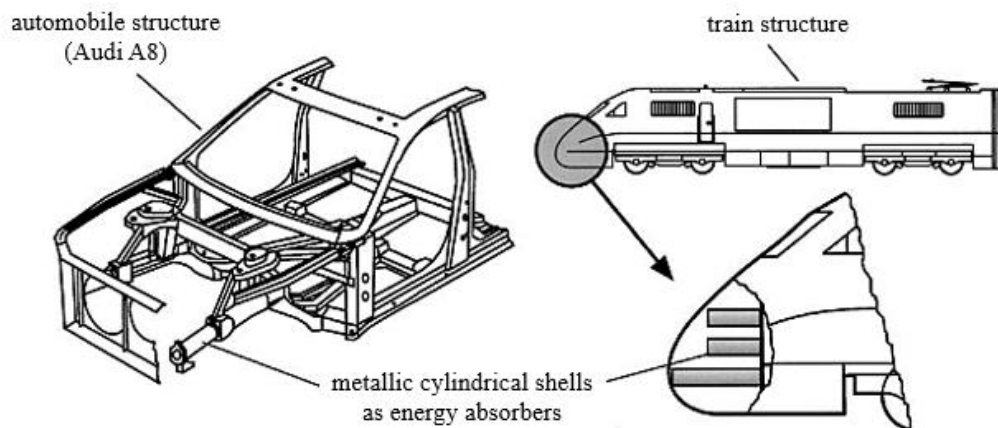
Secara teoritis, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi tentang penyerapan energi oleh *crash box* dengan aplikasi *aluminium foam*. Dengan analisis yang komprehensif, penelitian ini dapat menjadi tinjauan baru dalam mendesain *crash box* pada rangka mobil listrik.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. *Crash Box*

Kecelakaan kendaraan sering terjadi dalam kondisi kendaraan berkecepatan rendah. Dalam hal ini, keselamatan penumpang dan biaya perbaikan menjadi hal yang perlu diperhatikan. *Research Council for Automobile Repairs* (RCAR) adalah lembaga yang dibentuk untuk meningkatkan keselamatan penumpang dan untuk mengurangi biaya akibat kerusakan. Tujuan RCAR adalah untuk mengevaluasi biaya asuransi mobil dan membuat kendaraan lebih aman, tidak mudah rusak, dan lebih hemat dalam biaya perbaikan setelah kecelakaan (RCAR, 2021).

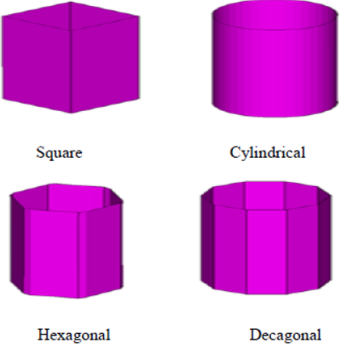
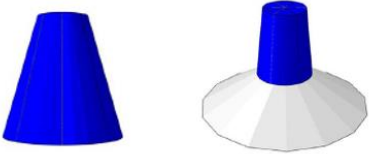
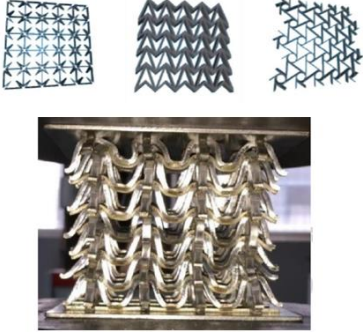
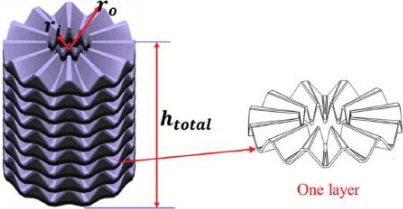
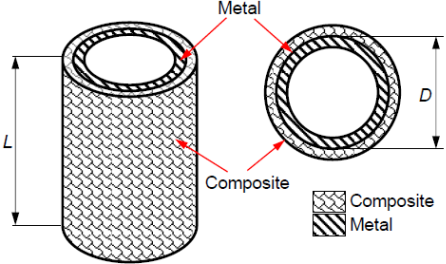


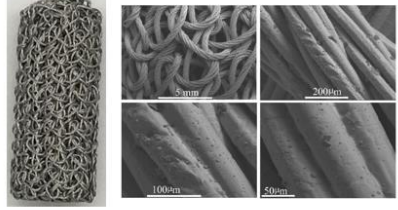
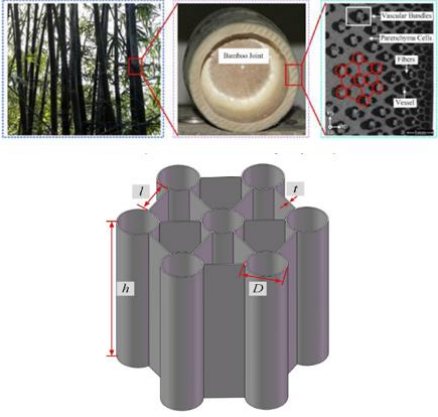
Gambar 2. 1. Posisi *crash box* pada rangka mobil (Ramon-Villalonga & Enderich, 2007)

Dalam kecelakaan kecepatan rendah, kerusakan pada struktur depan mobil sering terjadi. Peran struktur frontal mobil adalah untuk menghalangi transmisi energi benturan ke rangka kendaraan dengan menyerap energi benturan (Lee et al., 2013). Untuk memaksimalkan energi yang diserap oleh struktur frontal, *crash box* (Gambar 2.1) dipasang di depan kendaraan untuk menyerap energi tabrakan. Bentuk penampang dan material *crash box* sangat mempengaruhi penyerapan energi tumbukan karena kecilnya ruang tempat pemasangan *crash box*.

Menurut Abdullah et al., (2020), ada 3 faktor yang mempengaruhi daya serap energi *crash box*, yaitu: (1) struktur geometri, (2) material penyusun, dan (3) jenis pembebanan. Secara umum, struktur geometri *crash box* dapat diklasifikasi seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Klasifikasi geometri crash box

Geometri	Skema
<p style="text-align: center;">Tabung (<i>Nasir Hussain et al., 2017</i>)</p>	 <p style="text-align: center;">Square Cylindrical Hexagonal Decagonal</p>
<p style="text-align: center;">Kerucut (<i>Elahi et al., 2018</i>)</p>	
<p style="text-align: center;">Auxetic (<i>Gao et al., 2019</i>)</p>	
<p style="text-align: center;">Negative Poisson's Ratio (NPR) (<i>Gao et al., 2018</i>)</p>	 <p style="text-align: center;">One layer</p>
<p style="text-align: center;">Sandwich (<i>Boria et al., 2018</i>)</p>	 <p style="text-align: center;">Metal Composite</p> <p style="text-align: center;">Composite Metal</p>

<p>Porous-crochet sintered (PCS) (F. Wu et al., 2019)</p>	
<p>Struktur alam (struktur penampang bambu) (D. Hu et al., 2019)</p>	

Lebih lanjut, struktur *crash box* tidak hanya bermuara pada bentuk penampangnya. Kajian mengenai dinding strukturnya, juga dibagi ke dalam dua kategori, antara lain:

- a) Struktur dinding tebal (*thick-wall structure*)
- b) Struktur dinding tipis (*thin-wall structure*)

Sebuah komponen disebut struktur dinding tipis jika rasio ketebalan-radius bernilai sama besar atau lebih kecil dari 10% (Chan et al., 2015). Rasio struktur dinding tipis dapat dituliskan dalam persamaan (1) di bawah

$$\frac{t}{R} \leq 10\% \text{ atau } \frac{t}{D} \leq 5\% \quad \dots \quad (1)$$

Di mana t adalah tebal struktur, R adalah radius komponen, dan D adalah diagonal atau diameter komponen.

2.2. *Crashworthiness*

Crashworthiness (CW) adalah kemampuan kendaraan untuk menyerap energi benturan dan melindungi penumpang pada saat terjadi kecelakaan. Oleh karena itu, kendaraan dirancang dengan beberapa sistem pelindung yang bertujuan untuk meningkatkan kelakayakan kendaraan. Merancang komponen pelindung yang efisien adalah dengan memaksimalkan langkah kerjanya, memiliki beban rata-

rata yang setara dengan beban puncak, dan memiliki kemampuan energi spesifik yang tinggi. Kemampuan penyerapan energi ini dijelaskan dalam 7 parameter CW, antara lain:

a. *Massa yang tertekan*

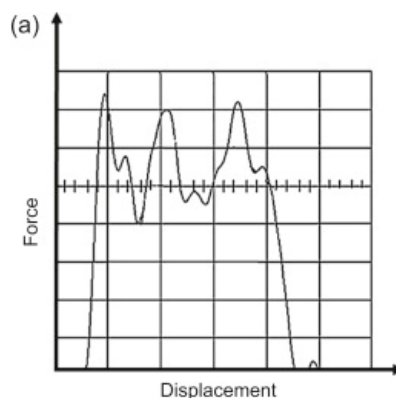
Massa yang tertekan (*displaced mass*, DM) menyatakan massa bagian spesimen yang mengalami deformasi akibat diberi gaya. Secara analitis, DM dapat diperoleh dengan menerapkan persamaan di bawah.

$$DM = \int_0^{disp_{max}} (\rho_1 A_1 + \rho_2 A_2 + \dots + \rho_n A_n) dz \quad \dots \quad (2)$$

Dimana ρ adalah rapat massa material dan A adalah luas penampang material. Nomor indeks 1, 2, dan seterusnya menandakan jumlah material penyusun spesimen CB. Sedangkan $disp_{max}$ adalah perpindahan maksimal impaktor yang menekan spesimen.

b. *Jarak penekanan*

Jarak penekanan (*displacement*, DISP) adalah selisih perpindahan maksimal terhadap posisi beban puncak pada uji tekan spesimen. Jarak penekanan dihitung ketika spesimen mengalami deformasi permanen yang dimana deformasi permanen terjadi setelah beban puncak tercapai.

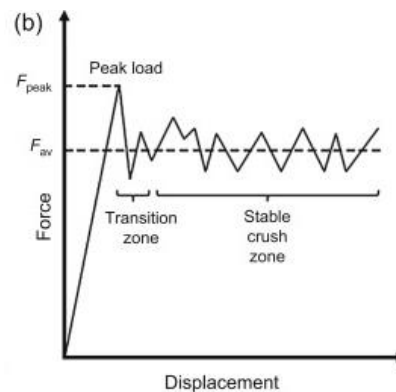


Gambar 2.2. Skema kurva gaya terhadap perpindahan

Tampak pada Gambar 2.2, spesimen mengalami deformasi permanen setelah melewati beban puncak pertama pada kurva gaya terhadap perpindahan.

c. *Beban puncak*

Beban puncak (F_{peak}) adalah batas gaya tertinggi yang dapat ditahan oleh spesimen sebelum mengalami deformasi permanen. Semakin rendah parameter beban puncak maka kemampuan serapan energi struktur tersebut semakin baik. Beban puncak yang rendah menandakan spesimen tersebut mudah menyerap energi karena energi yang diterima langsung dapat dikonversi menjadi deformasi pada spesimen.



Gambar 2.3. Bentuk umum kurva gaya terhadap perpindahan

Berdasarkan Gambar 2.3 di atas, penyerapan energi terjadi setelah melewati beban puncak.

d. *Total Energy Absorption (TEA)*

TEA adalah energi total yang diserap oleh struktur saat menerima benturan. Nilai TEA dipengaruhi oleh gaya yang diterima komponen dan perpindahan yang terjadi. Secara persamaan, TEA ditulis ke dalam bentuk

$$TEA = \int_{\delta_0}^{\delta} F(z) dz \quad \dots \quad (3)$$

Dimana F adalah fungsi beban yang diberikan di sepanjang penekanan, δ adalah perpindahan terjauh impaktor, dan δ_0 adalah jarak titik beban puncak. Semakin tinggi parameter TEA maka semakin baik pula penyerapan energi spesimen tersebut.

e. *Specific Energy Absorption (SEA)*

SEA adalah energi total (TEA) yang diserap oleh bagian spesimen yang tertekan (DM). Persamaan SEA dapat ditulis ke dalam bentuk

$$SEA = \frac{TEA}{DM} \quad \dots \quad (4)$$

Parameter SEA bernilai tinggi apabila DM suatu spesimen juga bernilai kecil. Semakin tinggi nilai parameter SEA maka semakin baik pula kemampuan penyerapan energi spesimen.

f. *Average Crush Load*

Gaya serap rata-rata (F_{mean}) adalah rasio antara TEA dengan jarak penekanan. Persamaan parameter ini dapat dituliskan ke bentuk

$$F_{mean} = \frac{TEA}{\delta - \delta_0} \quad \dots \quad (5)$$

Semakin tinggi parameter FMEAN suatu spesimen, maka semakin baik pula kemampuan penyerapan energinya.

g. *Crush Force Efficiency (CFE)*

CFE adalah rasio antara gaya serap rata-rata dengan beban puncak. CFE dapat memberikan informasi mengenai performa komponen ketika menyerap energi tumbukan. Ketika nilai CFE sama dengan 100% artinya komponen mencapai kemampuan maksimalnya, dimana total energi yang diterima, seluruhnya digunakan untuk mendeformasi komponen tanpa ada transmisi energi ke komponen yang melekat padanya. Persamaan CFE dapat dituliskan ke dalam persamaan di bawah

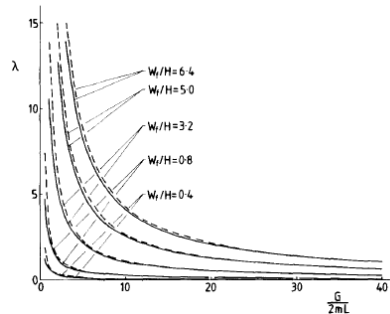
$$CFE = \frac{F_{mean}}{F_{peak}} \times 100\% \quad \dots \quad (6)$$

Persentase yang tinggi pada parameter CFE menandakan spesimen tersebut handal dalam menyerap energi tumbukan.

2.3. *Quasi-static Loading*

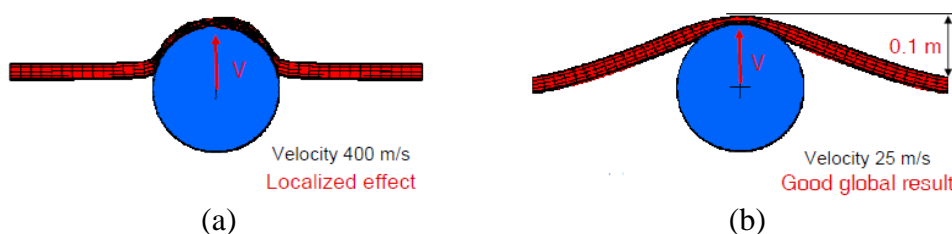
Untuk mengetahui kemampuan penyerapan energi suatu komponen, diperlukan pengujian tumbukan vertikal. Pada kecepatan tumbukan rendah, $v < 12$

m/s, pembebanan quasi-statik dapat digunakan sebagai alternatif karena hasil yang diperoleh tidak berbeda nyata apabila menggunakan pengujian tumbukan vertikal berdasarkan Gambar 2.4 (Jones, 1995).



Gambar 2.4. Perbandingan data hasil uji quasi statik dengan uji dinamik (Jones, 1995)

Pada dasarnya, pembebanan quasi statik dan pembebanan dinamik merupakan satu bagian pada jenis pembebanan siklik. Hanya saja akselerasi saat pembebanan quasi statik bernilai sangat kecil sehingga boleh diabaikan. Di samping itu, beban yang diterapkan pun lambat sehingga deformasi yang terjadi juga lambat. Kedua hal tersebut menyebabkan gaya inersia sangat kecil dan dapat diabaikan. Berbeda dengan pembebanan dinamik, di mana proses penerapan beban terjadi sangat cepat, sehingga menyebabkan vibrasi pada struktur komponen. Dengan hal tersebut, gaya inersia pada pembebanan dinamik menjadi faktor yang sangat harus diperhatikan (Nettles & Douglas, 2000). Gambar 2.5 memperlihatkan perbedaan antara kecepatan uji impact dengan kecepatan quasi statik.



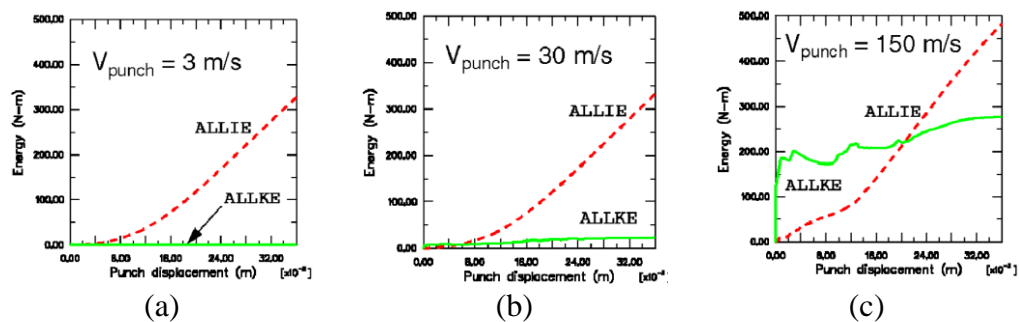
Gambar 2.5. Perbandingan deformasi spesimen pada (a) uji impact dan (b) uji quasi statik

Meskipun kecepatannya lebih tinggi dibanding dengan kecepatan uji tekan, dalam proses simulasi, uji quasi statik dapat dipandang sebagai uji tekan berkecepatan tinggi. Namun, agar uji quasi statik ini tetap dalam ranahnya tidak menjadi uji impact, maka kecepatan penekanannya harus ditentukan. Kecepatan uji

quasi statik bergantung pada spesimen yang akan diuji. Berikut adalah tahapan yang harus dilakukan untuk menentukan besar kecepatan quasi statik:

- 1) Menentukan frekuensi natural modulus pertama dari komponen
- 2) Menghitung periode waktu penekanan berdasarkan frekuensi natural komponen
- 3) Menetapkan jarak perpindahan impaktor pada pengujian
- 4) Menghitung kecepatan quasi statik v
- 5) Mengecek batas kecepatan quasi statik yang nilainya harus kurang dari 1% terhadap kecepatan rambat gelombang pada material komponen

Setelah kecepatan quasi statik didapatkan, keseimbangan energi internal dan energi kinetik perlu ditinjau. Fraksi antara energi kinetik terhadap energi internal spesimen berkisar antara 1-5% ketika uji quasi statik berlangsung (Y. Hu et al., 2015). Gambar 2.6 di atas merupakan 3 grafik yang menggambarkan hasil tinjauan keseimbangan energi uji quasi statik. Gambar (a) dan (b) memperlihatkan kondisi saat keseimbangan energi terpenuhi meskipun terdapat perbedaan kecepatan. Sedangkan pada gambar (c), kecepatan quasi statik yang dipilih melebihi standar uji quasi statik, sehingga tampak fraksi antara energi kinetik terhadap energi internal sistem melebihi kisaran 1-5% sesuai standar uji quasi statik.



Gambar 2.6. Kurva keseimbangan energi pada uji quasi statik dengan variasi kecepatan (a) 3 m/s, (b) 30 m/s, dan (c) 150 m/s

2.4. Aluminium Foam

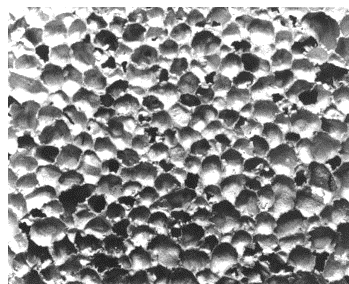
Definisi *foam* adalah terdispersinya gas ke dalam suatu fasa *liquid*. Dalam hal ini, jika gas tersebut terdispersi ke dalam *liquid-metal*, maka jenis ini disebut

liquid-metal foam. Bentuk padatan dari material ini selanjutnya disebut sebagai *metal foam* (Amin & Rashed, 2019). Aluminium merupakan logam yang memiliki beberapa keunggulan, di antaranya adalah tahan terhadap korosi, ringan, mudah dibentuk, dan sebagai penghantar listrik yang baik. Kombinasi dari karakteristik ini menjadikan aluminium sebagai salah satu logam yang tergolong ekonomis dan serbaguna.

Aluminum foam adalah salah satu *metal foam* yang paling sering dijumpai. Sesuai dengan pengertian sebelumnya, *aluminum foam* terdiri dari aluminium padat berpori yang menyusun sebagian besar badan material. Dimana unsur logam pada material ini hanya mengisi 5-25% dari keseluruhan volume *foam*. Dengan kata lain, *aluminium foam* memiliki porositas yang tinggi, dimana volume total porinya lebih besar dibanding volume logam solidnya (Mahadev et al., 2018). *Aluminum foam* terbagi ke dalam 2 kategori berdasarkan jenis porinya, yaitu:

a. *Foam berpori sel tertutup*

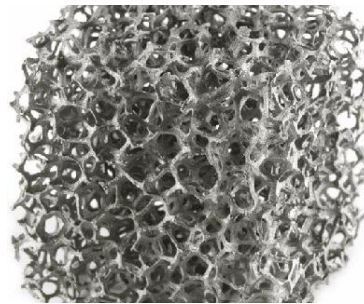
Pori-pori pada tipe ini saling tidak bersentuhan dan terisolasi oleh permukaan logam. *Foam* jenis ini banyak digunakan sebagai komponen penyerap benturan seperti halnya dengan busa polimer pada helm sepeda, hanya saja *metal foam* dapat menerima benturan yang lebih besar. Tidak seperti busa polimer yang memiliki sifat elastis, *metal foam* tidak elastis dan tetap dalam kondisi deformasinya setelah menerima benturan. Meskipun begitu, *metal foam* memiliki bobot yang ringan sehingga sangat cocok dijadikan komponen penyusun struktur ringan. Gambar 2.7 di bawah memperlihatkan bentuk permukaan *metal foam* yang berpori-sel tertutup.



Gambar 2.7. Struktur pori closed-cell metal foam (Veale, 2010)

b. Foam berpori sel terbuka

Berbeda dengan *foam* berpori-sel tertutup, pori pada *foam* ini saling berhubungan sehingga memungkinkan adanya aliran yang melewati pori-pori tersebut. *Foam* jenis ini dapat diaplikasikan pada sistem perpindahan kalor, seperti pendingin komponen elektronik, tangki kriogenik, dan penukar kalor PCM, juga pada sistem penyerapan energi kalor, dan difusi suatu aliran. Untuk ukuran pori yang lebih kecil (tidak kasat mata), *foam* ini dapat digunakan dalam aplikasi filter temperatur tinggi pada industri kimia. Secara umum, *foam* ini digunakan pada aplikasi perpindahan kalor. Gambar 2.8 di bawah memperlihatkan bentuk struktur pori terbuka pada *metal foam*.



Gambar 2.8. Struktur pori open-cell metal foam (Vasenjak, 2008)

Aluminum foam umumnya mempertahankan beberapa sifat fisik dari bahan dasarnya. Secara umum, karakteristik *aluminum foam*, seperti kekakuan, densitas, dan ketangguhan, juga terdapat pada material-material lain. Namun keunggulan dari *metal foam* secara khusus adalah kombinasi dari karakteristik material tersebut yang tidak dapat dimiliki oleh material lain. *Aluminum foam* memiliki sifat:

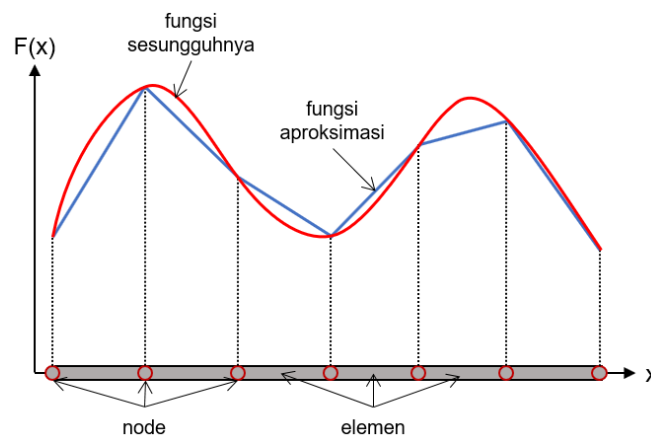
- a) Kekuatan (10 MPa) dan kekakuan (1 GPa) struktur yang cukup tinggi.
- b) Densitas yang rendah, yaitu sekitar 1/5 dari aluminium padatan.
- c) Kemampuan penyerapan energi mekanik, panas, dan getaran yang besar.

Kombinasi sifat-sifat ini menjadikan *aluminum foam* cocok untuk beberapa aplikasi, seperti konstruksi ringan, alat penyerap energi mekanik, akustik, dan termal.

2.5. Metode Elemen Hingga (MEH)

2.5.1. Definisi MEH

Finite Elemen Method atau Metode Elemen Hingga (MEH) adalah metode numerik untuk mendapatkan solusi permasalahan diferensial, baik persamaan diferensial biasa (*Ordinary Differential Equation*) maupun persamaan diferensial parsial (*Partial Differential Equation*). Karena persamaan diferensial seringkali digunakan sebagai model permasalahan teknik maka penting bagi para insinyur untuk dapat memahami dan mampu menerapkan MEH. Saat ini MEH merupakan salah satu metode numerik paling *versatile* untuk memecahkan problem dalam domain *kontinuum*.



Gambar 2.9. Aproksimasi solusi keseluruhan diperoleh dari penggabungan solusi-solusi elemen (Jahuddin, 2019)

Pada awalnya MEH dikembangkan untuk memecahkan problem di bidang mekanika benda padat (*solid mechanics*) tetapi sekarang MEH sudah merambah ke hampir semua permasalahan rekayasa teknik seperti mekanika fluida (*fluid mechanics*), elektromagnetik (*electromagnetism*), getaran (*vibration*), analisis modal (*modal analysis*), dan banyak lagi persoalan rekayasa teknik lainnya.

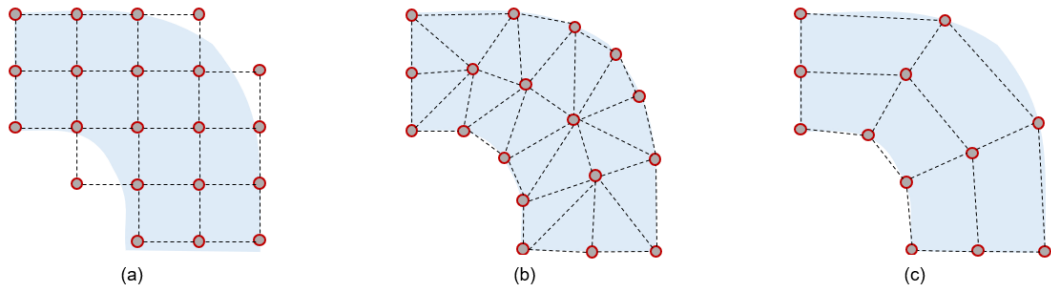
Proses inti MEH adalah membagi sistem yang kompleks menjadi bagian-bagian kecil atau elemen-elemen sehingga solusi yang lebih sederhana dapat dengan mudah diperoleh. Solusi dari setiap elemen jika digabungkan akan menjadi solusi sistem secara keseluruhan. Gambar 2.9. menjelaskan cara kerja MEH dimana solusi suatu sistem kompleks diaproksimalkan oleh solusi elemen. Untuk mendapatkan solusi elemental, MEH menggunakan fungsi interpolasi untuk mengaproksimasi solusi elemen. Untuk contoh tersebut suatu fungsi linear yang

seederhana digunakan sebagai fungsi interpolasi. Setelah solusi setiap elemen diperoleh, dengan menggabungkan solusi-solusi elemen maka solusi secara keseluruhan sistem dapat diperoleh. Dengan menggunakan fungsi polinomial seperti fungsi kuadrat sebagai fungsi interpolasi, solusi yang lebih akurat bisa diperoleh.

2.5.2. Penerapan MEH

Prinsip MEH adalah membagi domain permasalahan, baik itu domain ruang (*spatial domain*) atau domain waktu (*time domain*), menjadi sub-domain atau elemen yang lebih kecil. Dengan menghitung solusi pada elemen-elemen dan selanjutnya menggabungkan keseluruhan solusi elemental, solusi total dari permasalahan dapat diperoleh. Dalam menghitung solusi per elemen, solusi elemen tersebut harus memenuhi beberapa ketentuan, seperti kontinuitas pada titik-titik persambungan (*node*) dan antarmuka (*interface*) elemen.

Di samping MEH, metode numerik lain yang umum digunakan adalah Metode Perbedaan Hingga (MPH). Perbedaan utama dari kedua metode ini terletak pada solusi yang diperoleh dan juga bentuk (geometri) dari domain. MPH menghasilkan solusi aproksimasi pada titik-titik nodal (*pointwise solution*). Guna memperoleh solusi yang lebih akurat, jumlah titik nodal diperbanyak. MPH sulit digunakan pada domain dengan bentuk geometri yang kompleks. Hal ini dapat dipahami dari Gambar 2.10 yang berupa sebuah seperempat profil annulus. Mesh MPH digambarkan pada Gambar 2.10a dan mesh MEH pada Gambar 2.10b dan 2.10c terlihat bahwa dengan menggunakan MPH, titik-titik mesh (*nodes*) tidak berada pada batas annulus dengan tepat. Hal ini akan mengurangi akurasi hasil dari MPH. Secara teori MPH dapat digunakan pada problem dengan domain yang kompleks dengan syarat bahwa mesh berukuran kecil sehingga batas domain dapat diikuti oleh titik mesh secara lebih akurat. Hal tersebut tidak menjadi masalah untuk MEH karena titik-titik mesh MEH dapat diletakkan pada batas domain (Gambar 2.10b dan 2.10c). Gambar 2.10 menampilkan dua jenis elemen MEH, yaitu segitiga (*triangular element*) dan segiempat (*quadrilateral element*).



Gambar 2.10. (a) Mesh Metode Perbedaan Hingga, (b) elemen segitiga, dan (c) elemen segiempat

Solusi yang diperoleh dengan menggunakan MEH adalah fungsi interpolasi pada setiap elemen. Setelah fungsi interpolasi elemen dihitung, solusi keseluruhan dapat diperoleh. Fungsi-fungsi interpolasi setiap elemen ditentukan oleh nilai pada titik mesh. Pada persamaan (7) dan (8) notasi matrik gaya dinyatakan dalam $\{F\}$ dan matriks perpindahan dalam $\{u\}$.

$$\{F\} = \{F_{1x} \ F_{1y} \ F_{1z} \ F_{2x} \ F_{2y} \ \dots \ F_{nx} \ F_{ny} \ F_{nz}\}^T \quad \dots \quad (7)$$

$$\{u\} = \{u_{1x} \ u_{1y} \ u_{1z} \ u_{2x} \ u_{2y} \ \dots \ u_{nx} \ u_{ny} \ u_{nz}\}^T \quad \dots \quad (8)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{21} & \dots & k_{n1} \\ k_{12} & k_{22} & \dots & k_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{1n} & k_{2n} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \quad \dots \quad (9)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{21} & \dots & K_{n1} \\ K_{12} & K_{22} & \dots & K_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{1n} & K_{2n} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \quad \dots \quad (10)$$

Sedangkan pada persamaan (9) dan (10), matriks kekakuan elemen dinyatakan dalam $[k]$ dan matriks kekakuan global komponen dinyatakan dalam $[K]$.

2.6. Proses Optimasi

2.6.1. Metode Optimasi Taguchi

Metode optimasi Taguchi adalah salah satu metode desain eksperimen untuk menentukan variasi optimal dari suatu sistem. Metode ini dikembangkan berdasarkan susunan data ortogonal (*orthogonal array*, OA), dimana jumlah faktor dan level suatu data terlebih dahulu ditentukan. Data hasil metode ini berbentuk *signal-to-noise ratios* (SN ratio) yang merupakan rasio hasil rata-rata parameter

keluaran (*signal*) dengan standar deviasi keluaran (*noise*) tersebut. Nilai SN ratio yang tinggi menandakan sistem tersebut optimal karena memiliki *noise* yang kecil. Dengan kata lain, SN ratio merupakan fungsi objektif optimasi, yang dapat memberikan informasi mengenai hasil optimum suatu sistem (Ivens, 1983).

Karakteristik SN ratio umumnya terdiri dari 3 kriteria, yaitu *larger-the-better*, *smaller-the-better*, dan *nominal-the-best*.

a. *Larger-the-better* (LB)

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \dots \quad (11)$$

Dimana n adalah jumlah repikasi dan y adalah data yang diobservasi. Persamaan ini diterapkan jika karakteristik data yang diinginkan bernilai maksimal diantara data keluaran yang lain atau bersifat lebih besar lebih baik.

b. *Smaller-the-better* (SB)

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad \dots \quad (12)$$

Persamaan ini diterapkan jika karakteristik data yang diinginkan bernilai minimal diantara data keluaran yang lain atau bersifat lebih kecil lebih baik.

c. *Nominal-the-best* (NB)

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) \quad \dots \quad (13)$$

Dimana \bar{y} adalah target data yang diharapkan dan s adalah standar deviasi. Persamaan ini diterapkan jika karakteristik data yang diinginkan mendekati atau sama dengan target data.

Fungsi metode Taguchi adalah menyusun rancangan percobaan (*design of experiment*, DOE) yang berisikan kombinasi faktor percobaan dengan nilai level tertentu. Kombinasi ini disebut sebagai OA atau *orthogonal array*. Dengan menerapkan OA metode Taguchi, ukuran kombinasi variabel dapat diminimalkan dengan hanya memasukkan faktor yang mempengaruhi parameter keluaran. Di bawah ini merupakan desain OA metode Taguchi.

Tabel 2.2 Desain OA pada metode Taguchi

OA	Jumlah faktor	Level faktor	Jumlah eksperimen untuk desain faktorial	Jumlah eksperimen OA metode Taguchi
L4 (2^3)	3	2	8	4
L8 (2^7)	7	2	128	8
L9 (3^4)	4	3	81	9
L12 (2^{11})	11	2	2048	12
L16 (2^{15})	15	2	32768	16
L16 (4^5)	5	4	1024	16
L18 ($2^1 \times 3^7$)	1	2	4372	18

Tampak pada Tabel 2.2 di atas, dengan menggunakan metode Taguchi, jumlah eksperimen yang seharusnya dilakukan ratusan bahkan ribuan kali, dapat direduksi menjadi belasan eksperimen saja. Namun, kekurangan metode Taguchi adalah metode ini hanya dapat melakukan optimasi untuk 1 jenis keluaran. Metode ini tidak dapat melakukan optimasi yang keluarannya lebih dari satu (*multi-response problem*). Oleh karena itu, diperlukan metode tambahan agar sistem yang keluarannya lebih dari satu variabel dapat dioptimasi dengan benar.

2.6.2. Principal Component Analysis (PCA)

Tantangan yang umum dihadapi dalam melakukan optimasi adalah jika terdapat lebih dari satu jenis keluaran. Keluaran ini bisa berupa paket kumpulan variabel yang berbeda, seperti data kekasaran permukaan dan keausan mata pahat pada mesin bubut atau data konsumsi bahan bakar dan kebisingan pada eksperimen mesin diesel. Paket keluaran tersebut berisikan variabel yang satuannya berbeda. Beberapa paket keluaran bahkan memiliki karakteristik yang berbeda, seperti analisis struktur pesawat dimana karakter massa struktur lebih kecil lebih baik sedangkan karakter kekuatan strukturnya lebih besar lebih baik. Dalam analisis optimasi, kondisi tersebut disebut sebagai *multi-response problems* dimana terdapat beberapa jenis keluaran pada suatu proses eksperimen.

Proses optimasi metode Taguchi hanya dapat diaplikasikan untuk sistem yang memiliki satu jenis keluaran saja. Untuk itu dibutuhkan metode *multi-response optimization* yang dapat mengkonversi *multi-response problem* (MRP) kedalam data respon tunggal yang disebut *multi-response performance index*

(MRPI). Untuk menentukan MRPI, terdapat beberapa pendekatan yang bisa dilakukan, antara lain

a. *Weighted multi-response performance index* (WMRPI)

Salah satu metode untuk mengkonversi data respon majemuk ke dalam data tunggal adalah dengan menggunakan nilai bobot (*weightages*). Bobot ini berfungsi untuk menyeragamkan besaran data respon yang nilai dan karakteristiknya bervariasi.

$$MRPI = W_1R_1 + W_2R_2 + \dots + W_nR_n \quad \dots \quad (14)$$

Dimana *MRPI* adalah data tunggal respon MRPI, *R* adalah data respon yang diperoleh, dan *W* adalah bobot untuk masing-masing data respon tersebut. Persamaan *W* bergantung pada karakteristik data respon *larger-the-better* (LB) atau *smaller-the-better* (SB).

$$W_{LB_1} = \frac{R_1}{\sum_{i=1}^n R_n} \quad \dots \quad (15)$$

$$W_{SB_1} = \frac{1/R_1}{\sum_{i=1}^n (1/R_n)} \quad \dots \quad (16)$$

Dimana W_{LB_1} adalah bobot untuk data respon *larger-the-better* sedangkan W_{SB_1} adalah bobot untuk data respon *smaller-the-better*.

b. *Data envelopment analysis based Ranking Method* (DEAR)

Metode DEAR juga menggunakan bobot pada proses analisisnya. Namun dalam penerapannya, paket data respon-bobot LB harus dibandingkan dengan paket data respon-bobot SB. Sehingga nilai MRPI pada metode ini adalah rasio dari data respon LB dengan data respon SB.

$$MRPI = \frac{\sum_{i=1}^n (W_{LB_i} R_i)}{\sum_{j=1}^n (W_{SB_j} R_j)} \quad \dots \quad (17)$$

c. *Grey rational analysis* (GRA)

GRA digunakan untuk memecahkan paket data respon yang saling berkaitan atau memiliki repetisi pengambilan data. Dalam prosesnya, penerapan metode ini akan menghasilkan *grey rational coefficient* (GC) dan *grey rational*

grade (G_i) yang kemudian digunakan untuk menganalisis derajat relasional antara data respon majemuk.

Selain 3 metode yang disebutkan di atas, *principal component analysis* (PCA) adalah salah satu metode yang juga dapat memecahkan permasalahan data respon majemuk. Data majemuk ini dikonversi ke dalam data tunggal tanpa mengurangi informasi yang terkandung dalam data majemuk tersebut. Metode PCA memandang setiap data respon majemuk sebagai persamaan garis pada sistem koordinat berdimensi banyak (*orthogonal coordinate*), dimana jumlah dimensinya bergantung pada jumlah data respon majemuknya. Kemudian, metode ini mengtransformasi komponen garis tersebut ke dalam sistem koordinat baru. Transformasi ini dilakukan dengan menggunakan informasi *eigen value* dan *eigen vector* masing-masing data respon (Datta et al., 2009).

Untuk data yang memiliki karakter yang berbeda, sebelum dilakukan transformasi, proses normalisasi harus dilakukan terlebih dahulu. Normalisasi ini terbagi atas dua jenis karakter data, yaitu:

a. *Smaller-the-better* (SB)

$$N_{SBi}(k) = \frac{\min P_i(k)}{P_i(k)} \quad \dots \quad (18)$$

Dimana $\min P_i(k)$ adalah data minimum dalam kumpulan satu data respon yang berkarakter SB, $P_i(k)$ adalah data respon yang akan dinormalisasi, dan $N_{SBi}(k)$ adalah hasil normalisasi data.

b. *Larger-the-better* (LB)

$$N_{LBi}(k) = \frac{Q_i(k)}{\max Q_i(k)} \quad \dots \quad (19)$$

Dimana $\max X_i(k)_i$ adalah data maksimum dalam kumpulan satu data respon yang berkarakter LB, $Q_i(k)$ adalah data respon yang akan dinormalisasi, dan $N_{LBi}(k)$ adalah hasil normalisasi data

Setelah data dinormalisasi, besar *eigen vector* dan *eigen value* masing-masing data respon ditentukan. Proses menentukan nilai eigen dan vektor eigen dapat dilihat dalam proses di bawah.

a. Matriks persamaan nilai eigen

Persamaan transformasi matriks, secara umum dituliskan dalam bentuk di bawah ini.

$$\mathbf{A} \hat{\mathbf{X}} = \lambda \hat{\mathbf{X}} \quad \dots \quad (20)$$

Dimana \mathbf{A} adalah matriks data respon majemuk, $\hat{\mathbf{X}}$ adalah matriks vektor eigen, dan λ adalah nilai eigen. Persamaan di atas kemudian dapat ditulis ke dalam persamaan di bawah.

$$(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}) \hat{\mathbf{X}} = 0 \quad \dots \quad (21)$$

Dimana \mathbf{I} adalah matriks identitas.

b. Menentukan persamaan karakteristik

Persamaan karakteristik adalah determinan matriks $\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}$, yaitu:

$$\det(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}) = 0 \quad \dots \quad (22)$$

Penyelesaian persamaan karakteristik tersebut akan menghasilkan persamaan polinomial yang variabelnya merupakan nilai eigen. Persamaan polinomial tersebut secara umum ditulis dalam bentuk di bawah ini.

$$a_m \lambda^n + a_{m-1} \lambda^{n-1} + \dots + a_2 \lambda^2 + a_1 \lambda + a_0 = 0 \quad \dots \quad (23)$$

c. Nilai eigen setiap data respon

Nilai eigen adalah akar-akar dari persamaan polinomial yang solusinya dapat diketahui dengan menuliskan persamaan polinomial ke dalam persamaan di bawah.

$$(\lambda_1 - c_1)(\lambda_2 - c_2) \dots (\lambda_{n-1} - c_{n-1})(\lambda_n - c_n) = 0 \quad \dots \quad (24)$$

d. Vektor eigen koordinat data respon

Substitusi masing-masing nilai eigen ke persamaan nilai eigen untuk memperoleh matriks vektor eigen.

$$(\mathbf{A} - \lambda_n \mathbf{I}) \hat{\mathbf{X}}_n = 0 \quad \dots \quad (25)$$

Setelah eigen vektor diketahui, selanjutnya *major principal component* (Z) dapat ditentukan. Nilai Z adalah hasil perkalian titik (*dot product*) matriks baris

data respon yang sudah dinormalisasi (\mathbf{N}) terhadap matriks kolom vektor eigen ($\widehat{\mathbf{X}}$). Untuk menentukan nilai Z , digunakan persamaan di bawah.

$$Z_{ij} = (N_i \quad N_{i+1} \quad \dots \quad N_{n-1} \quad N_n) \cdot \begin{pmatrix} \widehat{X}_j \\ \widehat{X}_{j+1} \\ \vdots \\ \widehat{X}_{m-1} \\ \widehat{X}_m \end{pmatrix} \quad \dots \quad (26)$$

Nilai Z adalah data respon majemuk yang telah ditransformasikan ke dalam satu sumbu koordinat yang baru. Data respon tunggal atau MRPI disebut juga sebagai *composite principal component* (CPC) dalam metode PCA. Untuk memperoleh CPC, digunakan persamaan di bawah.

$$CPC_j = \sum_{i=1}^n AP_i Z_{ij} \quad \dots \quad (27)$$

Dimana i menyatakan kolom data respon dan j menyatakan baris data respon. Komponen AP disebut sebagai *accountability proportion*. Komponen AP menyatakan tingkat variasi data dalam kolom data respon. Semakin tinggi nilai AP maka semakin besar pula variasi data dalam data respon tersebut.