



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



**PENGEMBANGAN KEMAMPUAN ANALISIS
DINAMIKA BENDA FLEKSIBEL UNTUK MENDUKUNG
KEMANDIRIAN REKAYASA DI INDONESIA**

Profesor Leonardo Gunawan

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara
Institut Teknologi Bandung

**Aula Barat ITB
16 Maret 2024**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**PENGEMBANGAN KEMAMPUAN
ANALISIS DINAMIKA BENDA FLEKSIBEL
UNTUK MENDUKUNG KEMANDIRIAN
REKAYASA DI INDONESIA**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**PENGEMBANGAN KEMAMPUAN
ANALISIS DINAMIKA BENDA FLEKSIBEL
UNTUK MENDUKUNG KEMANDIRIAN
REKAYASA DI INDONESIA**

Prof. Leonardo Gunawan

16 Maret 2024
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

**PENGEMBANGAN KEMAMPUAN ANALISIS DINAMIKA BENDA FLEKSIBEL
UNTUK MENDUKUNG KEMANDIRIAN REKAYASA DI INDONESIA**

Penulis : Prof. Leonardo Gunawan

Reviewer : Prof. Tatacipta Dirgantara

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-416-6

e-ISBN : 978-623-297-417-3 (PDF)



© Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Kuasa atas rahmat dan berkah-Nya sehingga buku orasi ilmiah ini dapat selesai. Terima kasih juga disampaikan kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar ITB atas dukungan dalam pencapaian jabatan Guru Besar ini dan kesempatan untuk menyampaikan orasi ilmiah pada Sidang Terbuka FGB ITB pada tanggal 16 Maret 2024.

Naskah ini berisi informasi beberapa kegiatan penelitian yang telah dilakukan sejak penulis menyelesaikan pendidikan doktoral hingga saat ini. Secara umum, kegiatan penelitian yang disampaikan terkait dengan penyelesaian masalah dinamika sistem rekayasa yang terbagi atas dua bagian besar. Pertama adalah masalah dinamika benda fleksibel yang terjadi di daerah elastis material benda tersebut. Kedua adalah respons dinamik benda fleksibel di daerah plastis akibat beban impak dengan gaya tinggi dan terjadi secara cepat. Dalam tiap kategori, diberikan beberapa contoh aplikasi yang telah dikaji.

Semoga tulisan ini dapat menambah wawasan, menginspirasi, dan memberi manfaat bagi pembaca.

Bandung, 16 Maret 2024

Leonardo Gunawan

SINOPSIS

Dinamika benda fleksibel dalam dunia rekayasa merupakan suatu tantangan yang perlu diperhatikan dan diselesaikan untuk mendapatkan suatu desain sistem mekanik yang berfungsi baik dengan baik sesuai dengan tujuan desain. Dinamika benda terjadi akibat beban dinamis dalam bentuk gaya periodik, tidak periodik, transien (menghilang dalam waktu tertentu), atau acak. Jika beban cukup rendah dan menghasilkan tegangan yang berada di bawah kekuatan *yield* material, akan terjadi osilasi karena selama bekerjanya beban dinamis, energi potensial yang tersimpan pada struktur akan diubah bentuknya menjadi energi kinetik dan sebaliknya. Analisis yang dilakukan secara umum dibagi menjadi dua jenis, yaitu identifikasi karakteristik dinamik dan penentuan respons dinamis struktur. Analisis dilakukan untuk mendapatkan simpangan osilasi yang terjadi serta turunannya terhadap waktu, yaitu kecepatan dan percepatan. Data-data tersebut dapat digunakan untuk analisis berbagai hal yang diperlukan seperti kelelahan (*fatigue*) material, kenyamanan manusia, dan lain-lain. Jika beban dinamis yang bekerja pada struktur tinggi, maka akan terjadi deformasi yang memasuki daerah plastis, atau terjadi deformasi elastis dan plastis. Jika gaya berhenti bekerja, maka deformasi elastis struktur akan hilang namun deformasi plastisnya akan tetap ada, dan struktur tidak kembali ke bentuk semula. Dalam kasus ini, analisis berpusat pada bentuk deformasi plastis yang terjadi dan besar energi yang terdisipasi. Struktur seperti ini banyak dimanfaatkan sebagai struktur penyerap energi yang melindungi penumpang suatu kendaraan dalam kecelakaan.

Buku ini memuat kegiatan penelitian analisis dinamika benda fleksibel dalam dua rentang pembebanan tersebut, yaitu di daerah elastis dan hingga di daerah plastis. Buku dimulai dengan pengantar yang menjelaskan topik-topik yang dibahas. Bab berikutnya membahas kasus dinamika benda fleksibel di dalam daerah elastis. Pembahasan dimulai dengan kasus di mana beban dinamis hanya merupakan fungsi waktu dan diikuti dengan kasus di mana beban dinamis merupakan fungsi waktu dan gerak dari benda, kasus yang sering ditemui pada benda yang berosilasi dalam suatu fluida yang mengalir. Interaksi antara gaya-gaya yang bekerja dengan gerakan benda akan menghasilkan perubahan karakteristik dinamis benda tersebut. Di

bagian ini secara khusus dibahas kasus getaran pesawat terbang dalam aliran udara, yang merupakan bagian dari interaksi fluida-struktur, dan dikenal sebagai masalah aeroelastisitas. Gaya-gaya aerodinamika tak stasioner yang bekerja pada pesawat akan memodifikasi sistem yang semula hanya melibatkan gaya-gaya elastis, inersia, dan redaman mekanik jika tidak ada interaksi dengan aliran udara menjadi sistem aero-elasto-mekanik, atau disebut juga sistem aeroelastis, yang melibatkan gaya-gaya elastis, inersia, redaman mekanik, dan aerodinamika. Karena gaya-gaya aerodinamika selain tergantung geometri pesawat juga pada kecepatan dan ketinggian terbang, maka perilaku sistem aeroelastis akan berubah sesuai dengan kondisi kecepatan dan massa jenis udara atau ketinggian terbang. Dalam suatu kondisi terbang, pesawat udara bisa bersifat stabil, artinya jika ada gangguan pada pesawat terbang yang menghasilkan suatu osilasi, maka osilasi tersebut akan mengecil terhadap waktu. Namun di kondisi terbang lainnya, pesawat bisa bersifat tidak stabil, artinya suatu gangguan pada pesawat akan mengakibatkan terjadinya osilasi yang semakin membesar terhadap waktu dan dapat menghasilkan suatu hal yang katastropik. Di akhir bagian pertama, dibahas juga penelitian yang terkait dengan material maju dalam dinamika benda fleksibel. Penelitian ini terkait dengan studi penggunaan piezoelectric material sebagai aktuator dan sensor dan penerapannya untuk *structural health monitoring* (SHM).

Bab berikutnya membahas kasus dinamika benda fleksibel yang mendapat beban dinamis yang besar sehingga terjadi deformasi yang memasuki daerah plastis. Respons benda tergantung pada kekakuan sistem, yang bergantung pada geometri dan sifat materialnya. Sifat mekanik beberapa material bergantung pada laju pembebanan yang dialaminya, atau dikenal sebagai *strain rate sensitivity*, sehingga data sifat material pada berbagai laju regangan diperlukan dalam penelitian ini. Data tersebut berupa kurva tegangan terhadap regangan material hingga daerah plastis pada berbagai laju regangan (*strain rate*). Respons benda akibat beban dinamis yang besar dalam waktu singkat, atau dikenal sebagai beban impak (*impact*), dapat diprediksi menggunakan data tersebut dan energi yang diserap dapat dihitung dari kurva gaya vs deformasi benda. Pembahasan diawali dengan prinsip dasar mekanika impak, dan dilanjutkan dengan pengembangan alat uji yang digunakan untuk mengukur kurva gaya vs deformasi benda yang digunakan sebagai sarana validasi model simulasi numerik yang dikembangkan.

Selanjutnya, dibahas pengembangan alat yang digunakan untuk mengukur sifat material pada laju regangan tinggi, Split Hopkinson Pressure Bar, untuk mendapatkan model material yang memasukkan efek laju regangan dan dapat digunakan dalam simulasi numerik. Terakhir dibahas aplikasi analisis benda fleksibel hingga daerah plastis dalam peningkatan kelaikledakan kendaraan angkut personal dan penelitian kelaiktabrakan kereta cepat yang tengah dikembangkan di Indonesia.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	v
SINOPSIS	vii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xix
1 PENGANTAR.....	1
2 DINAMIKA BENDA FLEKSIBEL DALAM DAERAH ELASTIS.....	3
2.1 Karakteristik dan Respons Dinamik Benda Fleksibel	7
2.2 Aeroelastisitas	14
2.3 Material Maju dalam Aplikasi Dinamika Struktur	23
3 RESPONS BENDA FLEKSIBEL AKIBAT BEBAN IMPAK DI DAERAH PLASTIS	27
3.1 Pengukuran Gaya dan Deformasi.....	32
3.2 Pengujian Sifat Material pada Laju Regangan Tinggi.....	38
3.3 Pengembangan Struktur Tambahan Kendaraan Angkut Personel untuk meningkatkan Ketahanan terhadap Beban Ledakan	50
3.4 Studi Kelaiktabrakan Kereta Cepat Merah Putih	57
4 PENUTUP.....	67
5 UCAPAN TERIMA KASIH	69
DAFTAR PUSTAKA.....	71
CURRICULUM VITAE.....	79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Aliran di sekitar pipa dengan penampang lingkaran yang bersifat (a) laminar saat $t=1$ detik dan (b) membentuk vortex saat $t=5$ detik.....	4
Gambar 2	Segitiga Collar.....	5
Gambar 3	Pesawat (a) Bomber Handley Page O/400 dan (b) Fokker D-8 ...	5
Gambar 4.	Model matematis struktur pesawat, modus getar (b) puntir sayap (0.88 Hz), (c) bending sayap satu fasa (1.01 Hz), dan bending sayap berlawanan fase (1.85 Hz)	8
Gambar 5	Modus getar badan kereta dalam bentuk puntir (TR), bending lateral (LB), bending vertikal (VB), <i>breathing</i> (BR), dan kombinasi (CB) dalam rentang 0 -30 Hz	9
Gambar 6	(a) Satelit dengan panel matahari, (b) model komputasional satelit, (c) respons dinamik badan satelit dan panel matahari ketika diberi momen untuk mendapatkan <i>rolling</i> sebesar 0.1 derajat dalam waktu 2.7 detik, dan (d) dalam waktu	11
Gambar 7	(a) Model komputasional kendaraan truk semi-trailer dan (b) pembebanan akibat profil jalan dan (c) respons yang terjadi	11
Gambar 8	Diagram skematik kereta	12
Gambar 9	Lokasi pengamatan percepatan vertikal pada badan kereta, respons <i>car body</i> dalam bentuk percepatan vertikal (b) di atas bogie 1, (b) percepatan vertikal di atas tengah-tengah rantai badan kereta, dan (d) percepatan vertikal di atas bogie 2.	13
Gambar 10	(a) Geometri pesawat tempur, (b) model komputasional sayap pesawat, (c) modus getar bending pertama (25.8 Hz), dan (d) modus getar puntir pertama (68.9 Hz)	16
Gambar 11	Nilai redaman dan frekuensi terhadap kecepatan	17
Gambar 12	Respons struktur sayap yang terbang pada kecepatan 90 m/s dan 112 m/s dan mengalami gangguan berbentuk impuls	18
Gambar 13	Ilustrasi sayap pesawat yang terbang dan mengalami gangguan <i>gust</i>	19

Gambar 17	<i>Flutter derivatives</i> dari hasil identifikasi parameter data pengujian terowongan angin model jembatan bentang panjang	22
Gambar 18	(a) <i>Setup</i> pengujian sistem SHM berbasis piezoelektrik; (b) Ilustrasi spesimen pelat komposit dengan <i>inclusion damage</i> dan sensor/aktuator piezoelektrik	24
Gambar 19	Perbedaan respons sinyal melalui suatu pasangan aktuator-sensor pada pelat tanpa damage dan pelat yang memiliki damage	24
Gambar 20	(a) Ilustrasi bentuk lintasan dari berbagai pasangan aktuator-sensor dan (b) pencitraan yang dihaluskan dari perpotongan berbagai lintasan	25
Gambar 21	Perambatan <i>strain wave</i> melalui metode elemen hingga (a) sesaat setelah <i>input</i> diberikan pada aktuator dan (b) saat <i>strain wave</i> telah mencapai damage	26
Gambar 22	(a) Fungsi voltase dan (b) daya dari sayap dengan <i>skin</i> piezoelektrik saat terbang jelajah dan mengalami gangguan <i>gust</i>	26
Gambar 23	Model yang dipelajari oleh Rayhan: (a) Desain <i>fuselage</i> konvensional; (b) Desain dengan perbaikan penyerap energi yang diusulkan; (c) Skeleton view desain yang diusulkan; (d) Tampak depan desain yang diusulkan.....	28
Gambar 24	<i>Crash box</i> pada mobil dan kereta api	29
Gambar 25	<i>Road traffic barrier</i>	29
Gambar 26	Gaya penghancur vs jarak <i>crushing</i>	30
Gambar 27	<i>Dropped weight impact testing machine</i> yang dikembangkan di LSR FTMD.....	33
Gambar 28	Gaya impak pada kolom bujur sangkar dengan keliling 112 mm yang didapat dari pengujian dan simulasi MEH	33
Gambar 29	Geometri 4 kolom yang digunakan dalam pengembangan prosedur pengukuran gaya terhadap deformasi dan model MEH tipikal untuk kolom	34
Gambar 30	Deformasi kolom (a) SW, (b) SWFF, (c) DW, dan (d) DWFF dari hasil pengujian	35
Gambar 31	Deformasi kolom (a) SW, (b) SWFF, (c) DW, dan (d) DWFF dari hasil simulasi menggunakan MEH	35

Gambar 32	Kurva gaya impak vs deformasi untuk kolom SW, SWFF, DW, DWFF yang didapat dari eksperimen (E) dan dari simulasi MEH (N).....	36
Gambar 33	Deformasi plastis pada open cylindrical tube yang diperoleh secara (a) numerikal dan (b) eksperimen	36
Gambar 34	Deformasi plastis pada specimen tabung dengan penutup setengah bola	37
Gambar 35	Perbandingan hasil uji impak dengan hasil simulasi numerik menggunakan MEH	37
Gambar 36	Kurva tegangan-regangan material yang sensitif terhadap laju regangan	39
Gambar 37	Jenis-jenis pembebanan berdasarkan nilai laju regangan	40
Gambar 38	Skema alat <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>	41
Gambar 39	Ilustrasi gelombang regangan pada batang input menuju spesimen yang terdiri atas gelombang datang (ϵI) dan gelombang pantulan (ϵR) serta gelombang yang diteruskan ke batang <i>output</i> (ϵT)	41
Gambar 40	Contoh gelombang datang (<i>incident wave</i>), dan pantulan (<i>reflected</i>) serta terusan (<i>transmitted</i>) yang diukur dari strain gage	42
Gambar 41	Gelombang regangan datang (<i>incident</i>), pantulan (<i>reflected</i>) dan terusan (<i>transmitted</i>) hasil simulasi pengujian SHPB menggunakan MEH	44
Gambar 42	Gelombang regangan datang (<i>incident</i>), pantulan (<i>reflected</i>) dan terusan (<i>transmitted</i>) hasil simulasi pengujian SHPB menggunakan MEH yang telah dipilah per komponen	45
Gambar 43	(a) Strain rates, strain, dan (b) stress spesimen sebagai fungsi waktu	45
Gambar 44	(a) Laju regangan (<i>strain rates</i>) vs regangan (<i>strain</i>), dan (b) tegangan (<i>stress</i>) vs regangan (<i>strain</i>)	45
Gambar 45	Rancangan <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>	46
Gambar 46	<i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> yang dikembangkan di Laboratorium Struktur Ringan FTMD	47
Gambar 47	Skema eksperimen <i>cup drawing</i>	48
Gambar 48	Hasil eksperimen <i>cup-drawing</i> untuk lembaran baja (a) tipis, dan (b) tebal	48

Gambar 49 Perbandingan tinggi kupingan (*earing height*) antara hasil numerik dan eksperimen untuk lembaran tipis dalam bentuk (a) *side to side* dan (b) *overlay* 49

Gambar 50 Perbandingan tinggi kupingan (*earing height*) antara hasil numerik dan eksperimen untuk lembaran tebal dalam bentuk (a) *side to side* dan (b) *overlay* 49

Gambar 51 Spesimen *sandwich* busa aluminium yang digunakan dalam uji ledak..... 52

Gambar 52 *Set-up* uji ledakan menggunakan 8 kg TNT: (a) tampak depan, dan (b) tampak samping 52

Gambar 53 Skema lengkap validasi eksperimental *aluminum foam sandwich* yang diberi beban ledakan 8 kg TNT dengan penutup baja 53

Gambar 54 Model numerik uji ledakan: (a) model quarter symmetry, (b) kondisi batas, (c) posisi akselerometer, dan (d) sistem klem (ukuran dalam mm) 54

Gambar 55 Perbandingan gaya reaksi yang diukur dan berdasarkan simulasi MEH untuk kasus ledakan dengan 60 gram TNT..... 54

Gambar 56 Perbandingan kerusakan spesimen: (a) Model spesimen, (b) kerusakan akibat peledak yang dimodelkan menggunakan SPH tanpa wadah (*casing*), (c) (b) kerusakan akibat peledak yang dimodelkan menggunakan SPH dan wadah, (d) hasil pengujian..... 55

Gambar 57 Penerapan AFS sebagai pelindung kendaraan pengangkut personel lapis baja terhadap ledakan dari bawah dan model MEH kendaraan dan penumpang di dalamnya 56

Gambar 58 Kinematika penumpang kendaraan pengangkut personel selama ledakan 8 kg TNT sebelum dilakukan modifikasi kursi 57

Gambar 59 Kinematika penumpang kendaraan pengangkut personel selama ledakan 8 kg TNT setelah dilakukan modifikasi kursi 57

Gambar 60 Konfigurasi tipikal *pushback coupler*, *energy absorber*, dan *anti-climber* 58

Gambar 61 Model kereta dengan detail di bagian depan yang digunakan dalam simulasi tabrakan 58

Gambar 62 Pandangan *isometric* model detail bagian depan kereta 59

Gambar 63 Gaya reaksi kereta pada berbagai panjang deformasi 60

Gambar 64	Mode deformasi CEM hasil simulasi tabrakan model kereta .	60
Gambar 65	Skenario tabrakan kereta menggunakan model lengkap	61
Gambar 66	Model geometri kereta cepat: desain asli (atas) dan desain alternatif (bawah)	62
Gambar 67	Posisi dan deformasi desain asli (atas) dan desail alternatif (bawah) pada saat $t = 450$ ms	63
Gambar 68	Bagian maskara KCMP (warna hijau)	64
Gambar 69	Skenario tabrakan kereta menggunakan model dengan maskara	64
Gambar 70	Bentuk Deformasi Maskara Untuk Berbagai <i>Running Case</i> (a) Aluminium 10 mm (b) Aluminium 3 mm (c) Komposit	65

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Spesifikasi sistem batang alat SHPB yang dikembangkan di Laboratorium Struktur Ringan FTMD	47
Tabel 2	Level perlindungan penumpang kendaraan tempur dari ancaman ranjau	50
Tabel 3	Gaya vertikal, percepatan, dan perpindahan roda hasil simulasi tabrakan menggunakan kereta dengan bagian depan yang dimodelkan secara detail	61
Tabel 4	Uraian penyerapan energi kinetik tabrakan sebesar 2.36 MJ oleh berbagai komponen kereta	63
Tabel 5	Gaya vertikal, percepatan, perpindahan roda, dan <i>passenger survival zone</i> hasil simulasi tabrakan menggunakan seluruh kereta yang dimodelkan secara detail	64

1 PENGANTAR

Berbagai masalah dinamika benda fleksibel yang terjadi dalam dunia rekayasa merupakan suatu tantangan yang perlu diperhatikan dan diselesaikan untuk mendapatkan suatu sistem mekanik yang berfungsi dengan baik sesuai dengan tujuan desain. Kelompok Keahlian (KK) Struktur Ringan di Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara merupakan suatu KK yang memiliki *roadmap* penelitian dalam bidang dinamika pada struktur wahana transportasi yang mengalami berbagai jenis pembebanan, baik statik maupun dinamik. Dalam orasi ilmiah ini dibahas beberapa penelitian yang dikembangkan di KK tersebut terkait dengan masalah perilaku dan respons suatu benda fleksibel yang mengalami pembebanan dinamik.

Masalah dinamik terjadi akibat pembebanan suatu benda fleksibel oleh gaya-gaya yang berubah terhadap waktu secara berulang, tidak berulang, acak, atau acak (*random*). Respons yang terjadi dapat berada di daerah elastis, di mana hubungan tegangan dan regangan material benda bersifat linear, jika beban tidak terlalu besar, atau memasuki daerah plastis, di mana hubungan antara regangan dan tegangan tidak lagi linear, jika beban besar.

Analisis benda fleksibel di daerah elastis secara umum dibagi menjadi dua jenis, yaitu karakterisasi perilaku dinamik dan penentuan respons dinamik bendanya. Analisis karakteristik dinamik dilakukan untuk mengetahui frekuensi alami dan modus getar benda. Analisis respons dinamik dilakukan untuk menentukan gerakan osilasi benda akibat gaya-gaya luar yang bekerja.

Untuk benda fleksibel yang berosilasi secara elastis dalam aliran fluida, selain gaya-gaya elastis, inersia, redaman mekanik, dan gaya luar, terdapat juga gaya interaksi antara benda dan fluida. Gaya-interaksi ini dapat mengubah karakteristik osilasi benda menjadi tidak stabil dalam daerah kecepatan aliran tertentu. Analisis karakteristik dinamik benda dalam aliran fluida dilakukan untuk menentukan daerah kecepatan fluida yang membuat osilasi benda stabil dan daerah kecepatan lain yang membuat osilasi tidak stabil. Kondisi stabil ditandai dengan makin mengecilnya simpangan osilasi benda setelah mendapat gangguan dan kondisi tidak stabil ditandai dengan semakin membesarnya amplitudo osilasi yang terjadi setelah benda

mendapat gangguan luar. Kondisi tidak stabil dapat dapat mengakibatkan kegagalan material jika tegangan benda yang terjadi melebihi kekuatannya.

Jika gaya yang bekerja pada benda fleksibel besar dan mengakibatkan tegangan yang melebihi batas elastis kekuatan benda, maka benda akan mengalami deformasi plastis. Dalam kasus ini analisis dipusatkan pada bentuk deformasi dan besar energi yang diserap oleh deformasi plastis. Besar energi yang diserap dihitung menggunakan kurva gaya yang bekerja vs deformasi benda sebagai luas area di bawah kurva tersebut. Benda yang mengalami deformasi plastis sering dimanfaatkan untuk komponen penyerap energi pada suatu kendaraan, di mana saat terjadi kecelakaan energi kinetik kendaraan akan diserap oleh komponen tersebut melalui deformasi plastis.

Dinamika benda fleksibel dapat diteliti secara analitik, eksperimen, dan/atau numerik. Metode analitik biasanya dilakukan untuk kasus sederhana. Metode numerik saat merupakan andalan untuk kasus kompleks karena lebih efisien dari sisi biaya dan waktu. Metode eksperimen, yang banyak dilakukan pada masa lalu, saat ini digunakan untuk validasi model numerik yang dikembangkan atau untuk melakukan sertifikasi kinerja produk rekayasa jika diperlukan oleh lembaga yang memiliki otoritas. Metode eksperimen juga dilakukan untuk mendapatkan data dasar kerekayasaan seperti kurva tegangan-regangan hingga daerah plastis suatu material pada berbagai laju pembebanan. Data ini sangat diperlukan dalam perhitungan respons benda fleksibel saat mengalami pembebanan dinamik yang besar dalam waktu singkat atau beban impact (*impact*).

Buku ini memberikan gambaran penerapan analisis masalah dinamika pada struktur di industri yang terkait dengan keilmuan yang dikembangkan di Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara. Pertama disampaikan studi masalah dinamika benda fleksibel yang terjadi di mana respons benda berada di daerah elastis, termasuk studi kasus interaksi benda dengan aliran di sekitarnya, dan kedua studi masalah respons benda fleksibel yang mengalami beban impak di mana kondisi tegangan-regangan benda tersebut memasuki daerah plastis. Penguasaan metode dan perangkat untuk menyelesaikan masalah dinamik tersebut diharapkan dapat membantu industri di Indonesia dalam menghasilkan produk yang berkualitas dengan kinerja yang baik.

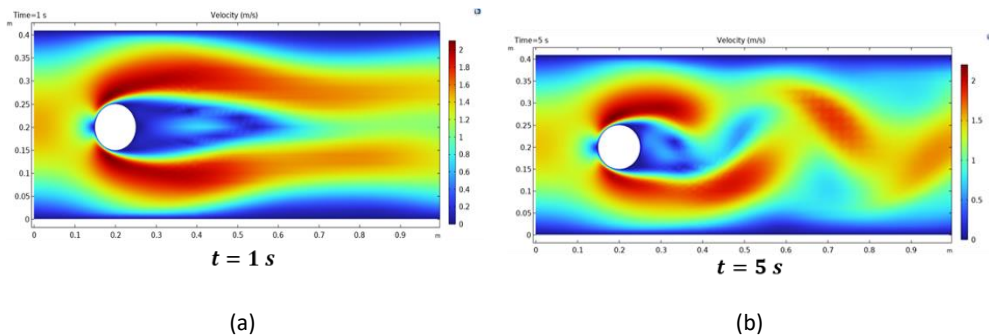
2 DINAMIKA BENDA FLEKSIBEL DALAM DAERAH ELASTIS

Dinamika benda fleksibel adalah bidang keilmuan yang mempelajari perilaku suatu benda fleksibel yang mengalami pembebanan dinamis. Beban dinamis muncul dari berbagai hal seperti angin, ombak, lalu lintas kendaraan, orang berjalan, gempa bumi, dan ledakan. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi perpindahan, kecepatan, dan percepatan benda serta untuk mendapatkan karakteristik dinamik benda fleksibel berupa frekuensi alami dan modus getarnya. Dalam analisis, benda dimodelkan sebagai sistem kontinu dengan massa, kekakuan dan redaman yang terdistribusi dalam ruang serta respons yang terjadi berada di dalam daerah elastis material struktur.

Dalam kebanyakan kasus dinamika benda fleksibel, gaya-gaya yang bekerja hanya merupakan fungsi waktu saja dan tidak terpengaruh oleh gerakan struktur. Namun dalam kasus di mana benda bergerak dalam fluida, seperti pesawat yang terbang di udara, gaya-gaya yang bekerja tidak hanya merupakan fungsi waktu, tetapi juga berinteraksi dengan gerakan pesawat terbang. Interaksi struktur dengan fluida di sekitarnya akan mengubah perilaku dinamik struktur. Interaksi ini dapat menyebabkan struktur mengalami ketidakstabilan, yang ditandai dari terjadinya osilasi struktur dengan amplitudo yang makin membesar terhadap waktu akibat gangguan kecil. Contoh interaksi struktur fluida dapat ditemui pada getaran yang terjadi pada komponen alat musik tiup ketika dilalui udara yang dihembuskan, pipa dalam aliran air, atau pipa dalam aliran udara di penukar panas (*heat exchanger*). **Gambar 1** menunjukkan simulasi numerik aliran udara di sekitar pipa yang saat awal bersifat laminar dan beberapa saat kemudian membentuk vorteks secara bergantian di belakang pipa (*shedding vortex*) dengan frekuensi tertentu (Brantas, 2023). Jika frekuensi *shedding vortex* mendekati frekuensi alami struktur pipa, maka struktur akan tereksitasi dan beresonansi. Fenomena ini dikenal sebagai *vortex induced vibration* (VIV) dan dapat mengganggu fungsi pipa tersebut.

Dalam teknik dirgantara, kasus interaksi fluida-struktur pada pesawat terbang di udara dikenal dengan nama aeroelastisitas. Aeroelastisitas didefinisikan sebagai bidang yang mempelajari interaksi antara gaya-gaya elastis, inersia, dan aerodinamika tak stasioner pada suatu struktur dalam

aliran udara. Interaksi berbagai bidang ini digambarkan menggunakan sketsa seperti ditunjukkan pada **Gambar 2**, yang dimulai oleh A.R. Collar pada tahun 1940-an (Hodges & Pierce, 2011). Dengan munculnya desain wahana terbang dengan aspek rasio yang besar dan makin fleksibel pada saat ini, interaksi antara berbagai bidang menghasilkan interaksi keilmuan yang semakin banyak (Djojodihardjo, 2023). Bidang mekanika terbang yang semula melibatkan analisis gaya-gaya aerodinamika dan gaya inersial tanpa memperhatikan fleksibilitas pesawat, saat ini harus memasukkan aspek fleksibilitas pesawat jika frekuensi fleksibel pesawat masuk ke dalam rentang frekuensi gerakan benda kaku pesawat terbang (Palacios & Cesnik, 2023).

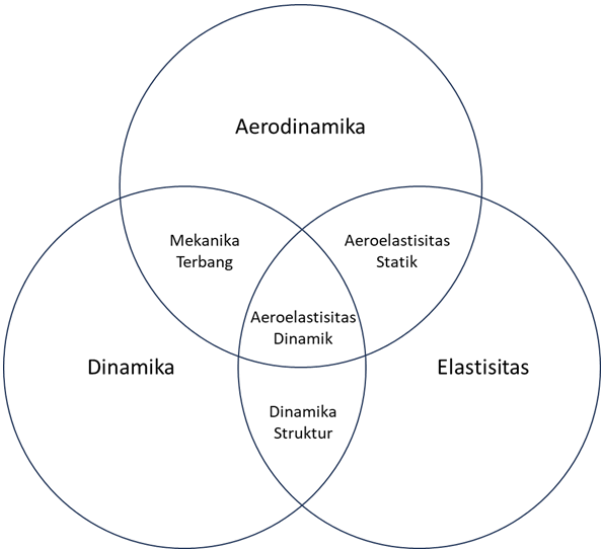


Gambar 1 Aliran di sekitar pipa dengan penampang lingkaran yang bersifat (5) laminar saat $t=1$ detik dan (b) membentuk vortex saat $t=5$ detik (brasntas, 2023).

Kasus aeroelastisitas pesawat terbang yang pertama kali tercatat dan terdokumentasi adalah kasus *flutter* pesawat bomber Handley Page O/400, seperti ditunjukkan pada **Gambar 3 (a)**, yang pada tahun 1916 mengalami getaran berlebih pada bagian ekor. Sayap dan sayap ekor (*tailplane*) pesawat ini menggunakan konfigurasi *biplane* dengan kekakuan puntir yang besar karena *interplane bracing*. Bagian *fuselage* belakang memiliki kekakuan puntir yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan kekakuan sayap dan sayap ekor. Getaran pada bagian ekor terjadi akibat dari kurangnya kekakuan batang torsi yang menghubungkan elevator kanan dan kiri (Bisplinghoff, et al., 1957). Insiden ini menghasilkan terjadinya osilasi puntir dinamik *fuselage* sebesar 45 derajat yang terkait dengan getaran *flapping* antisimetrik *elevator*.

Masalah aeroelastisitas pada sayap muncul saat bahan konstruksi pesawat digantikan dengan aluminium dan konsep sayap *biplane* diganti dengan konsep *monoplane*. Kekakuan puntir sayap *monoplane* yang lebih rendah daripada kekakuan sayap *biplane* memunculkan kasus *flutter*, *loss of aileron*

effectiveness, dan *load redistribution*. **Gambar 3 (b)** menunjukkan pesawat Fokker D-8 yang berulang kali mengalami kegagalan sayap pada saat melakukan *high-speed dive*. Penyebab kejadian tersebut adalah redistribusi beban sayap yang mengakibatkan beban berlebih pada kecepatan tinggi (Bisplinghoff, et al., 1957). Hingga saat ini, masih tercatat beberapa insiden terkait fenomena aeroelastisitas pada pesawat, di antaranya insiden Reno Air Race Crash (NTSB, 2011) di mana terjadi kelonggaran baut pada bagian sambungan elevator salah satu pesawat yang menyebabkan turunnya kekakuan hingga terjadi flutter pada bidang kendali dan mengakibatkan kegagalan struktur. Hal serupa juga terjadi pada sebuah pesawat yg dioperasikan di New Zealand dan mengalami rudder flutter hingga terjadi kegagalan struktur (CAA, 2018).



Gambar 2 Segitiga Collar



(a)



(b)

Gambar 3 Pesawat (a) Bomber Handley Page O/400 dan (b) Fokker D-8 (Flickr, Inc., 2024)

Kegagalan katastrofik pesawat karena fenomena aeroelastisitas sejak saat itu menjadi perhatian dan menjadi salah satu aspek yang harus dikaji dalam perancangan pesawat terbang. Perancang harus dapat menunjukkan bahwa pesawat udara harus bebas dari fenomena flutter dan divergensi dalam *flight envelope*-nya. Peraturan penerbangan yang diterbitkan oleh FAA dalam FAR 23.629 dan FAR 25.629 menyatakan bahwa kecepatan terbang jelajah (*cruise*) pesawat ditentukan sebagai fungsi kecepatan *dive*, yang merupakan nilai kecepatan maksimum. Besar kecepatan ini ditentukan menggunakan berbagai kriteria, salah satunya adalah ketidakstabilan aeroelastis. Karena itu keilmuan ini harus dikuasai dan terus dikembangkan di ITB guna mendukung keberadaan industri dirgantara di Indonesia.

Masalah aeroelastisitas dapat juga terjadi pada berbagai benda lain dalam aliran udara seperti pipa, jembatan bentang panjang, dan gedung. Peristiwa hancurnya Jembatan Tacoma di tahun 1940 merupakan kasus aeroelastisitas jembatan paling awal dan dikenal dalam sejarah. Berbagai pemodelan aerodinamika dan aeroelastisitas telah dilakukan guna memprediksi kestabilan jembatan bentang panjang dalam tahap desain (Wu & Kareem, 2013).

Kebaruan dan inovasi aplikasi dalam bidang dinamika struktur tidak terlepas dari perkembangan dalam bidang material. Material maju atau material pintar menjadi salah satu landasan utama dalam pengembangan saat ini. Salah satu material maju yang sangat dekat dengan prinsip dinamika struktur atau getaran mekanik adalah material piezoelektrik. Material piezoelektrik memiliki kemampuan untuk mengubah besaran mekanik menjadi besaran elektrik atau sebaliknya. Kemampuan tersebut menjadi dasar pemanfaatan material piezoelektrik sebagai sensor maupun aktuator dalam beberapa dekade terakhir. Sebagai sensor, material piezoelektrik memberi *output* berupa tegangan listrik yang proporsional dengan regangan struktur akibat pembebanan mekanik. Sebaliknya, sebagai aktuator, respons mekanik material piezoelektrik berupa regangan yang proporsional dengan *input* berupa beban elektrik dimanfaatkan untuk menghasilkan defleksi suatu struktur.

Dalam bab ini pembahasan dimulai dengan topik dinamika struktur secara umum, dilanjutkan dengan kasus di mana terjadi interaksi antara gaya-gaya fluida dengan gerakan struktur. Di bagian akhir dibahas pemanfaatan

material piezoelektrik sebagai sensor, aktuator, atau pemangkit energi terkait dengan masalah dinamika struktur. Sebagai sensor, *piezoelectric patch* dapat memberi regangan mekanik pada sebuah struktur berdasarkan *input* elektrik. Sebaliknya, *piezoelectric patch* dapat mengeluarkan sinyal elektronik jika struktur tempat menempelnya *piezoelectric patch* tersebut mengalami regangan mekanik.

2.1 Karakteristik dan Respons Dinamik Benda Fleksibel

Sebuah struktur sebagai benda fleksibel pada berbagai macam sistem kerekayasaan memiliki karakteristik dinamik yang unik, bergantung pada sifat mekanik material dan konfigurasinya. Elastisitas dan massa jenis material serta volume dan penampang adalah beberapa parameter yang membentuk parameter kekakuan dan inersia, yang kemudian menentukan karakteristik dinamis suatu struktur. Saat struktur mengalami gangguan atau mendapatkan pembebanan dinamik, maka respons struktur juga akan menjadi fungsi waktu. Berbagai macam gangguan dan pembebanan dapat muncul dari kondisi operasi dan lingkungan struktur. Sebagai contoh, pesawat terbang mendapat gangguan dari turbulensi udara, mobil mendapatkan gangguan akibat ketidakrataan profil jalan, bangunan terkena angin atau gempa bumi.

Persamaan gerak suatu struktur fleksibel secara umum berbentuk sebagai berikut.

$$[M]\{\ddot{z}\} + [B]\{\dot{z}\} + [K]\{z\} = \{F\} \quad (2.1)$$

di mana

$[M]$ = matriks massa

$\{F\}$ = vektor gaya-gaya

$[B]$ = matriks redaman

$\{z\}$ = vektor perpindahan

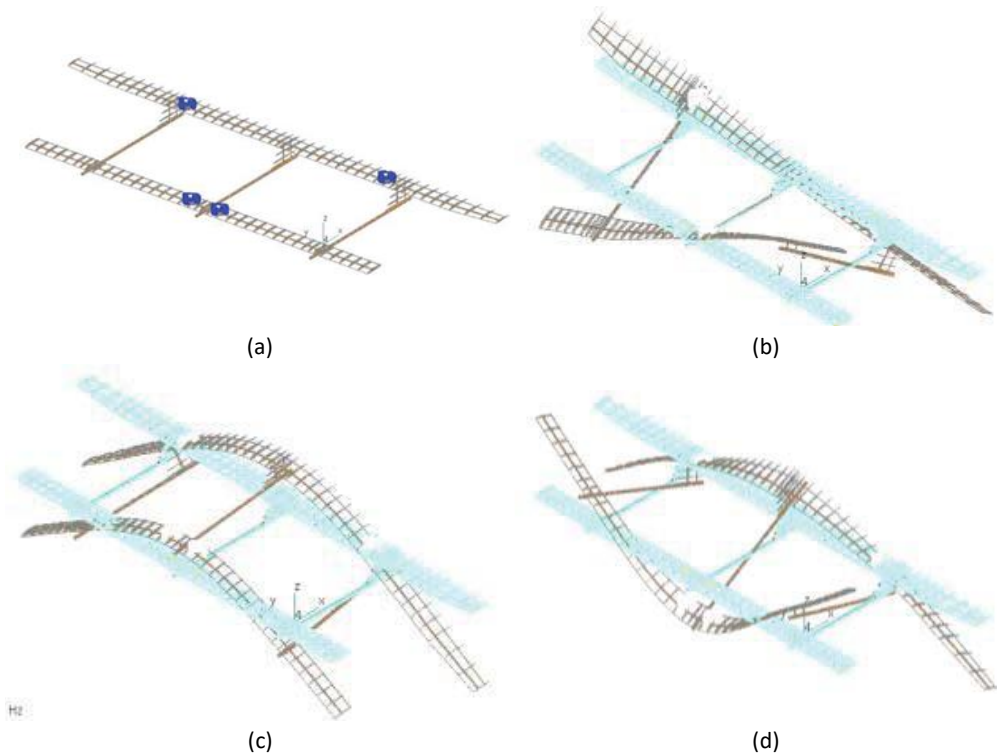
$[K]$ = matriks kekakuan

Gaya eksitasi F pada ruas kanan Persamaan (2.1) merupakan *input* sistem, sedangkan perpindahan z adalah *output*-nya. Untuk meninjau karakteristik dinamik struktur fleksibel, ditinjau kondisi saat tidak ada gaya eksitasi dan redaman, sehingga Persamaan (2.1) dapat diubah menjadi masalah nilai karakteristik (*eigen value problem*) sebagai berikut.

$$[M]\{\ddot{z}\} + [K]\{z\} = \{0\} \quad (2.2)$$

Analisis karakteristik dinamik, yang dikenal juga sebagai *modal analysis*, dilakukan dengan menyelesaikan Persamaan (2.2) untuk mendapatkan nilai karakteristik dan vektor karakteristik yang merepresentasikan frekuensi alami dan modus getar struktur. Model matematis ini dapat berbentuk analitis untuk kasus sederhana ataupun dalam bentuk model komputasional untuk kasus kompleks. Model matematis dapat diverifikasi melalui eksperimen getaran bebas menggunakan struktur sesungguhnya atau model fisik struktur berskala dengan cara memberikan *input* impuls atau simpangan awal pada model struktur tersebut dan mengukur respons yang terjadi.

Gambar 4 (a) menunjukkan model komputasional struktur pesawat HALE dengan tiga *boom* dan sayap tandem yang sedang dikembangkan di FTMD ITB (Moelyadi, et al., 2022). Model komputasional dibangun menggunakan metode elemen hingga (MEH). **Gambar 4 (b), (c), dan (d)** berturut-turut menunjukkan hasil analisis karakteristik dinamik pesawat tersebut berupa tiga modus getar pertama.



Gambar 4. Model matematis struktur pesawat, modus getar (b) puntir sayap (0.88 Hz), (c) bending sayap satu fasa (1.01 Hz), dan bending sayap berlawanan fase (1.85 Hz) (Ramadhani, et al., 2021)

Gambar 5 menunjukkan hasil analisis karakteristik dinamis badan kereta menggunakan MEH. Dapat dilihat bahwa kereta memiliki berbagai modus getar fleksibel mulai dari 8.63 Hz dalam bentuk modus puntir (*torsional*), bending vertikal maupun lateral, *breathing*, dan kombinasi dari berbagai bentuk. Semakin tinggi frekuensi alami, semakin kompleks bentuk modus getar badan kereta. Hasil ini selanjutnya digunakan untuk menganalisis respons kereta terhadap ketidakrataan rel kereta yang dijelaskan dalam subbab selanjutnya.



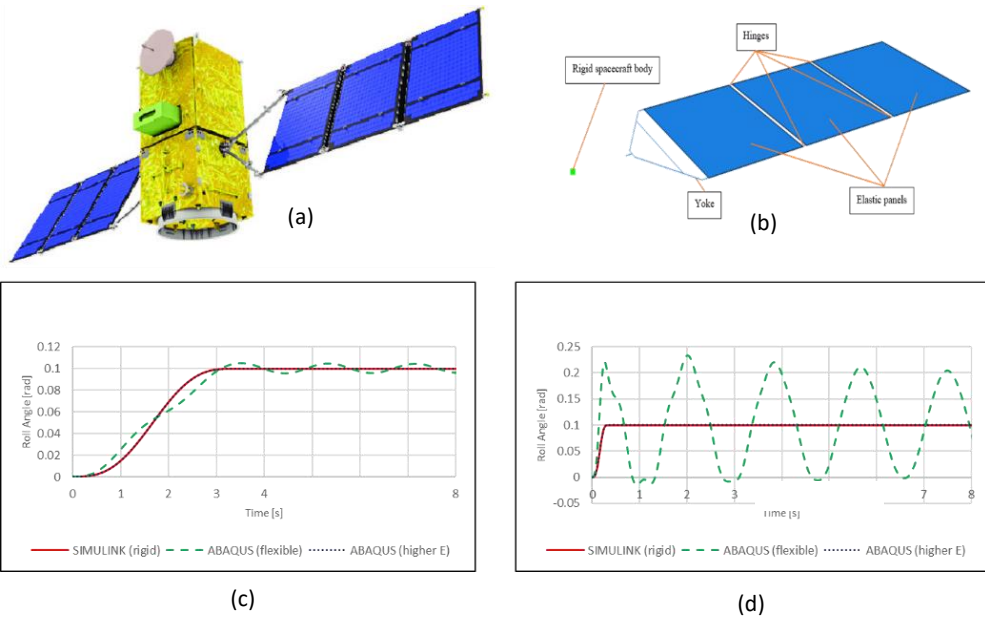
Gambar 5 Modus getar badan kereta dalam bentuk puntir (TR), bending lateral (LB), bending vertikal (VB), *breathing* (BR), dan kombinasi (CB) dalam rentang 0 -30 Hz (Yaffie, et al., 2023)

Setelah karakteristik dinamis suatu benda fleksibel diperoleh dan divalidasi, tahap selanjutnya adalah evaluasi respons benda terhadap beban dinamis. Beban dinamis paling sederhana berbentuk harmonis, atau sinusoidal, dengan amplitudo, frekuensi dan fasa tertentu. Evaluasi respons akibat beban harmonis merupakan hal mendasar dalam analisis dinamika benda fleksibel. Respons benda akan berbeda jika frekuensi beban harmonis berubah, dan besarnya bergantung pada kedekatan frekuensi alaminya dengan frekuensi beban dinamis. Resonansi akan terjadi jika frekuensi alami benda dekat dengan frekuensi beban. Saat resonansi, amplitudo respons benda akan meningkat secara signifikan dan dapat mengakibatkan kegagalan benda. Dalam perancangan suatu sistem rekayasa, biasanya telah dilakukan

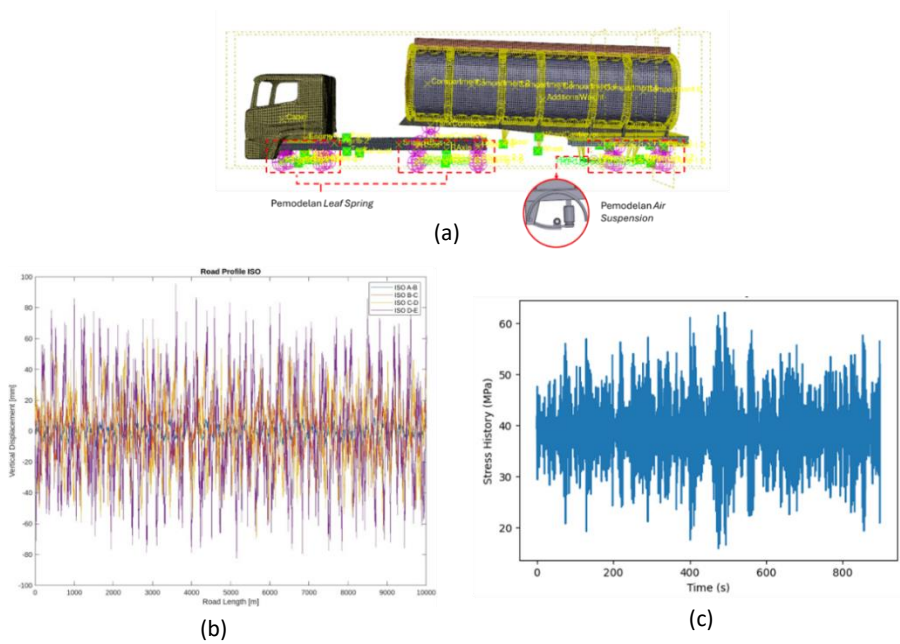
analisis yang detail untuk mencegah terjadinya resonansi ketika sistem tersebut dioperasikan.

Beban yang bekerja pada struktur dalam kenyataannya tidak hanya berbentuk harmonik, tetapi juga dapat berbentuk periodik, nonperiodik, transien, atau acak (*random*). Beban periodik berulang terhadap waktu secara teratur, beban nonperiodik tidak berulang terhadap waktu (contoh: *step function*), beban transien hanya bekerja dalam waktu singkat (contoh: impuls). Beban periodik, nonperiodik, dan transien dikategorikan sebagai beban deterministik. Beban deterministik dapat direpresentasikan sebagai kombinasi dari beberapa bentuk sederhana, misalnya harmonik, dan respons benda dapat ditentukan menggunakan prinsip superposisi jika sistem bersifat linier. Beban acak dikategorikan sebagai beban nondeterministik yang tidak dapat diprediksi sebagai fungsi waktu dan harus dianalisis menggunakan pendekatan probabilitas dan statistik (Inman, 2014).

Respons struktur terhadap berbagai jenis beban dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut. Data respons struktur dalam bentuk amplitudo simpangan dan waktu dapat digunakan untuk memprediksi apakah suatu sistem dapat berfungsi dengan baik. **Gambar 6** menunjukkan hasil studi respons dinamik struktur sebuah satelit yang dilengkapi dengan panel surya (Kevin, 2022). **Gambar 6 (a)** menunjukkan geometri dan **Gambar 6 (b)** menunjukkan model komputasional satelit di mana badan satelit dianggap sebagai benda kaku dan panel surya sebagai benda fleksibel. Beban yang bekerja pada struktur satelit berasal dari momen rolling yang bekerja pada badan satelit. **Gambar 6 (c)** dan **Gambar 6 (d)** berturut-turut menunjukkan respons satelit berupa gerakan *rolling* badan satelit dan arah panel (*pointing direction*) sebagai akibat dari momen *rolling* yang bekerja dengan besar yang sama, tetapi berbeda waktu penerapannya, untuk mendapatkan rotasi badan satelit sebesar 0.1 radian dalam waktu 3.3 detik dan 0.3125 detik. Dapat dilihat bahwa panel mengalami osilasi yang berbeda akibat berbedanya waktu penerapan momen.

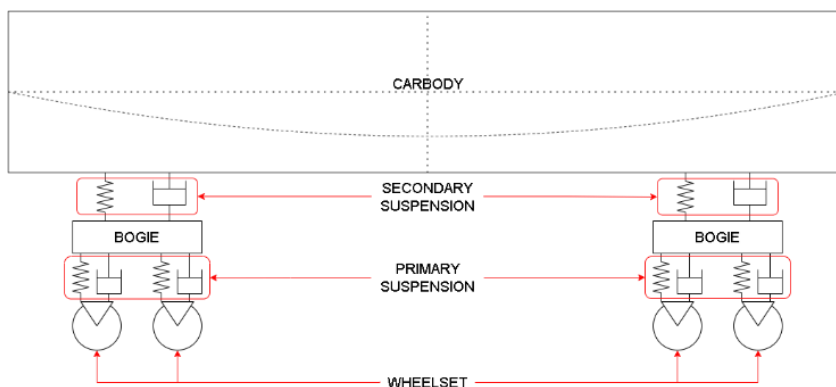


Gambar 6 (a) Satelit dengan panel matahari, (b) model komputasional satelit, (c) respons dinamik badan satelit dan panel matahari ketika diberi momen untuk mendapatkan *rolling* sebesar 0.1 derajat dalam waktu 2.7 detik, dan (d) dalam waktu (Kevin, 2022)



Gambar 7 (a) Model komputasional kendaraan truk semi-trailer dan (b) pembebanan akibat profil jalan dan (c) respons yang terjadi (Putra, et al., 2023)

Gambar 7 menunjukkan contoh lain evaluasi respons dinamik yang didapat dari simulasi MEH struktur kendaraan truk semi-trailer berupa tegangan terhadap waktu (Putra, et al., 2023). **Gambar 7 (a)** menunjukkan model komputasional kendaraan dan beban yang terjadi berasal dari berat kendaraan ditambah gerakan akibat profil kekasaran jalan yang dilalui, seperti ditunjukkan pada **Gambar 7 (b)**. Akibat pembebanan tersebut terjadi respons dinamik pada struktur yang kemudian diproses menjadi riwayat tegangan (*stress history*) seperti ditunjukkan **Gambar 7 (c)**. Hasil-hasil tersebut selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi kelelahan (*fatigue*) material kendaraan dan menentukan umur pakai kendaraan.

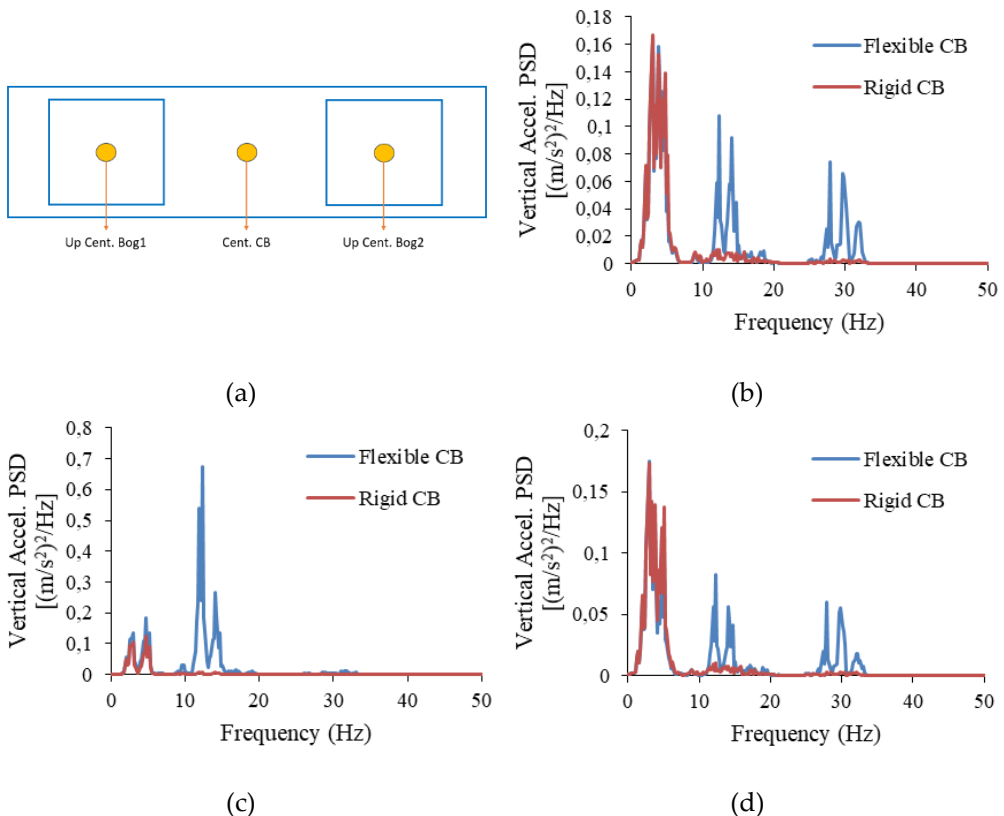


Gambar 8 Diagram skematik kereta

Gambar 8 menunjukkan diagram skematik kereta yang terdiri atas badan kereta (*carbody*), suspensi primer (*primary suspension*), suspensi sekunder (*secondary suspension*), dan set roda (*wheel set*). Analisis respons dinamik dilakukan menggunakan perangkat lunak *Universal Mechanism* dengan tujuan untuk mengetahui respons percepatan badan kereta saat bergerak dengan kecepatan 120 km/jam. Respons ditinjau berdasarkan kondisi ketidakrataan rel yang baik, sesuai dengan standar UIC yang tersedia dalam perangkat lunak. Dua model dikembangkan, model pertama di mana badan kereta dianggap sebagai benda kaku dan model kedua di mana badan kereta dianggap sebagai benda fleksibel. Model kedua kedua diperoleh dengan memanfaatkan hasil analisis karakteristik dinamik badan kereta yang ditampilkan pada **Gambar 5**.

Gambar 9 (a) menunjukkan tampak atas badan kereta dan lokasi pengamatan percepatan pada lantai, yaitu di atas Bogie 1, ditengah-tengah badan kereta, dan di atas Bogie 2. **Gambar 9 (b), (c), dan (d)** berturut-turut

menunjukkan percepatan vertikal yang dialami badan kereta pada ketiga posisi tersebut. Pada masing-masing titik pengamatan, dilakukan perbandingan antara respons yang didapat menggunakan model dengan badan kereta sebagai benda kaku atau sebagai benda fleksibel. Dapat dilihat bahwa respons di bagian tengah badan kereta lebih tinggi dibandingkan dengan respons di atas bogie. Hal ini dapat dikaitkan dengan modus bending vertikal badan kereta. Selanjutnya, masing-masing gambar menunjukkan bahwa respons di bawah 10 Hz yang diprediksi menggunakan kedua model tidak menunjukkan perbedaan. Namun, di atas 10 Hz terlihat perbedaan yang berarti di mana respons yang lebih tinggi diamati dari model dengan badan kereta diasumsikan sebagai benda fleksibel. Hal ini menunjukkan bahwa pemodelan yang sesuai dengan kondisi sebenarnya diperlukan untuk dapat memprediksi respons dinamis kereta dengan baik.



Gambar 9 Lokasi pengamatan percepatan vertikal pada badan kereta, respons *car body* dalam bentuk percepatan vertikal (b) di atas bogie 1, (c) percepatan vertikal di atas tengah-tengah lantai badan kereta, dan (d) percepatan vertikal di atas bogie 2.

2.2 Aeroelastisitas

Dalam pembahasan sebelum ini, beban dinamik yang bekerja pada suatu benda fleksibel merupakan suatu fungsi *input* yang independen terhadap bentuk dan gerakan benda yang ditinjau. Dalam beberapa kasus, terutama pada benda yang berosilasi dalam aliran fluida, beban yang bekerja juga bergantung pada bentuk dan gerakan benda yang dianalisis. Dalam kasus pesawat terbang yang dianggap sebagai benda fleksibel, saat struktur sayap mengalami defleksi akibat beban aerodinamika yang bekerja, maka distribusi tekanan udara pada sayap akan berubah mengikuti defleksi yang terjadi. Beban aerodinamika pada pesawat tidak lagi dapat dianggap sebagai beban eksternal yang independen terhadap bentuk dan gerakan fleksibel sayap, tetapi juga harus melibatkan komponen gaya yang menunjukkan interaksi gaya-gaya aerodinamika dengan gerakan fleksibel sayap. Kondisi interaksi ini secara matematis dilakukan dengan memodifikasi Persamaan (2.1) menjadi:

$$[M]\{\ddot{z}\} + [B]\{\dot{z}\} + [K]\{z\} = \{F\}_{int} + \{F\}_{ext} \quad (2.3)$$

$\{F\}_{int}$ menyatakan gaya aerodinamika yang berinteraksi dengan gerakan fleksibel pesawat, terbang sedangkan $\{F\}_{ext}$ menyatakan gaya eksternal yang tidak bergantung pada gerakan fleksibel pesawat terbang. Gaya interaksi secara umum dapat dirumuskan sebagai fungsi gerakan fleksibel struktur, yaitu perpindahan, kecepatan dan percepatannya:

$$\{F\}_{int} = [B_0]\{\dot{z}\} + [B_1]\{\ddot{z}\} + [B_2]\{z\} \quad (2.4)$$

Dengan demikian persamaan dinamika struktur dapat dituliskan sehingga semua komponen gaya yang bergantung pada perpindahan, kecepatan dan sisi kanan persamaan hanya berisi gaya-gaya eksternal:

$$[M - B_0]\{\ddot{z}\} + [C - B_1]\{\dot{z}\} + [K - B_2]\{z\} = \{F\}_{ext} \quad (2.5)$$

Suku-suku pada sisi kiri Persamaan (2.5) sekarang berubah dibandingkan dengan yang ada pada sisi kiri Persamaan (2.1) karena adanya koefisien gaya-gaya aerodinamika tak stasioner. Sistem yang semula hanya direpresentasikan oleh parameter mekanikal berupa massa, kekakuan, dan redaman, sekarang mendapat tambahan suku terkait gaya-gaya aerodinamika tak stasioner yang berinteraksi dengan gerakan fleksibel pesawat terbang. Sistem ini disebut sebagai sistem aeroelastomekanik atau aeroelastis.

Studi sistem aeroelastis biasanya dimulai dengan mempelajari karakteristik dinamikanya, yaitu dengan meninjau sistem tanpa adanya gaya-gaya eksternal, sehingga persamaan gerak sistem dapat dituliskan menjadi:

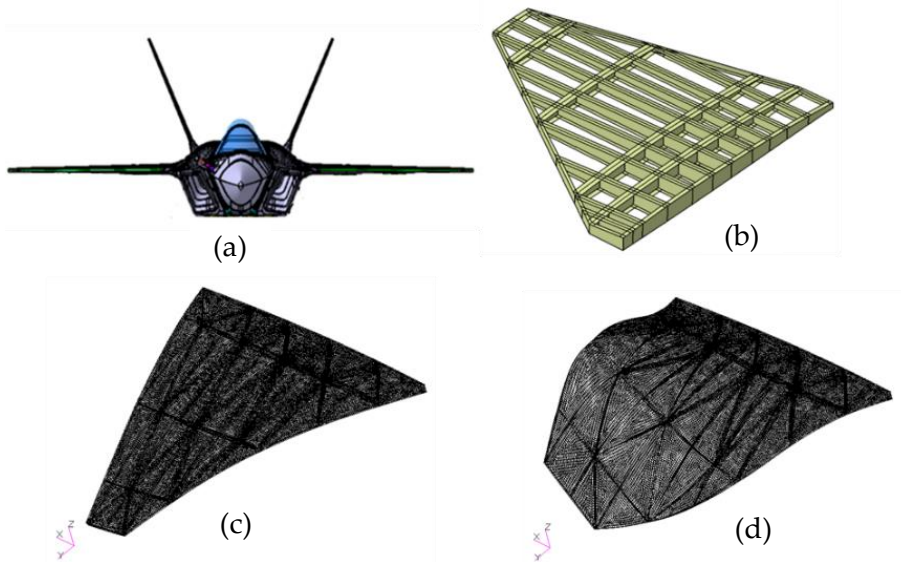
$$[M - B_0]\{\ddot{z}\} + [C - B_1]\{\dot{z}\} + [K - B_2]\{z\} = 0 \quad (2.6)$$

Secara matematis, kasus ini dapat diselesaikan sebagai masalah karakteristik, seperti dalam pembahasan sebelumnya yang ditunjukkan oleh Persamaan (2.2). Perbedaan mendasar dengan sistem sebelum ini adalah nilai karakteristik dan vektor karakteristik sistem ini merupakan fungsi sifat mekanik dan koefisien gaya-gaya aerodinamika pada sistem. Dengan menyatakan respons sistem dalam bentuk eksponensial, $\{z\} = \{Z\}e^{st}$, perilaku sistem dapat dievaluasi dari nilai akar karakteristik s yang diperoleh. Jika bagian *real* s berharga *negative*, maka sistem bersifat stabil dan jika bagian *real* s berharga positif, sistem bersifat tidak stabil

Karena gaya-gaya aerodinamika bergantung pada variabel kecepatan dan masa jenis udara, suku-suku di sisi kiri Persamaan (2.6) akan berubah jika kecepatan pesawat dan ketinggian terbang berubah. Dengan demikian nilai karakteristik dan vektor karakteristik akan berubah mengikuti kondisi terbang pesawat. Biasanya analisis dilakukan untuk ketinggian terbang tertentu, atau masa jenis udara tertentu, dan mengubah-ubah kecepatan terbang. Dengan mengevaluasi nilai karakteristik pada berbagai kecepatan, dapat diketahui daerah kecepatan di mana pesawat bersifat stabil dan daerah kecepatan lain di mana pesawat tidak stabil. Kecepatan pesawat di mana salah satu bagian *real* nilai karakteristik berubah dari negatif ke positif mengindikasikan terjadinya ketidak stabilan. Untuk nilai karakteristik yang berbentuk bilangan kompleks dan bagian *real*-nya berubah dari negatif menjadi positif, maka ketidakstabilan yang terjadi berbentuk osilasi dengan amplitude yang membesar terhadap waktu. Fenomena ini dikenal sebagai *flutter* dan kecepatan di mana terjadi ketidak stabilan jenis ini disebut kecepatan *flutter*. Untuk nilai karakteristik yang berbentuk bilangan riil yang berubah dari negatif menjadi positif, ketidak stabilan yang terjadi berbentuk peningkatan defleksi pesawat terhadap waktu tanpa adanya osilasi. Fenomena ini dikenal sebagai divergensi dan kecepatan di mana terjadi ketidakstabilan jenis ini disebut kecepatan divergensi.

Analisis ketidakstabilan suatu sistem aeroelastis diilustrasikan menggunakan kajian sayap sebuah pesawat tempur (Izzuddin, et al., 2021).

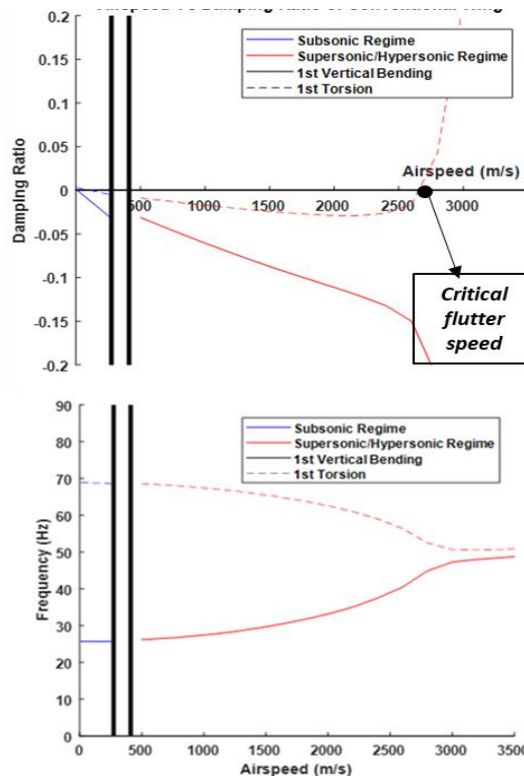
Gambar 10 (a). menunjukkan tampak depan pesawat dan **Gambar 10 (b)** menunjukkan model komputasional struktur sayap. Tahap pertama analisis adalah mengevaluasi karakteristik dinamik sayap tanpa aliran udara, mengikuti Persamaan (2.2), di mana parameter yang terlibat adalah matriks massa M dan matriks kekakuan sayap K , sedangkan matriks redaman C biasanya tidak dilibatkan dalam tahap awal. Analisis karakteristik dinamik mendapatkan frekuensi alami struktur dan modus getarnya. **Gambar 10 (c)** dan **Gambar 10 (d)** berturut-turut menunjukkan modus getar bending pertama dan torsi pertama. Analisis *flutter* dilakukan dengan menggunakan beberapa modus getar dan biasanya dua modus tersebut merupakan pasangan modus yang menyebabkan terjadinya *flutter*.



Gambar 10 (a) Geometri pesawat tempur, (b) model komputasional sayap pesawat, (c) modus getar bending pertama (25.8 Hz), dan (d) modus getar puntir pertama (68.9 Hz) (Izzuddin, et al., 2021)

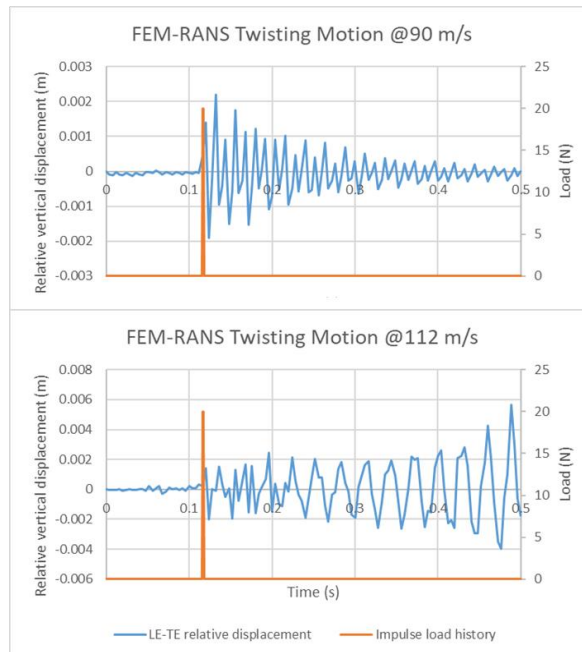
Tahap selanjutnya adalah memodelkan gaya-gaya aerodinamika berdasarkan bentuk modus getar sayap yang telah didapat. Model aerodinamika sayap dibuat untuk tiap bentuk modus getar, pada berbagai kecepatan udara, dan pada berbagai frekuensi getaran. Dalam contoh ini analisis dilakukan pada ketinggian dekat dengan permukaan air laut. Untuk daerah subsonik, digunakan metode Doublet Lattice (DLM) dan untuk daerah supersonik digunakan teori piston. Dengan didapatkannya model

aerodinamika yang berisikan matriks B_0 , B_1 dan B_2 pada Persamaan (2.5), maka persamaan aeroelastis tersebut sudah lengkap dan dapat diselesaikan untuk mendapatkan akar-akar karakteristik dinamik sistem. **Gambar 11** menunjukkan akar-akar persamaan sebagai fungsi kecepatan, yaitu redaman (bagian riil akar imajiner) dan frekuensi (bagian imajiner akar karakteristik). **Gambar 11 (a)** menunjukkan bahwa redaman modulus *bending* makin bertambah negatif dengan meningkatnya kecepatan pesawat sedangkan redaman modulus *torsion* pada awalnya juga bertambah negatif, tetapi kemudian berbalik arah menuju nilai positif. Dengan demikian diketahui bahwa ketidak stabilan sayap terjadi pada kecepatan 2660 m/s yang jauh di atas kecepatan operasional pesawat. Data frekuensi vs kecepatan menunjukkan adanya interaksi antara kedua modulus getar yang digunakan dalam analisis. **Gambar 11 (b)** menunjukkan bahwa frekuensi modulus *bending* dan *torsion* saling mendekat dengan meningkatnya kecepatan pesawat. Hal ini mengindikasikan adanya kopling aerodinamika antara kedua modulus getar tersebut yang menyebabkan terjadinya *flutter*.



Gambar 11 Nilai redaman dan frekuensi terhadap kecepatan (Izzuddin, et al., 2021)

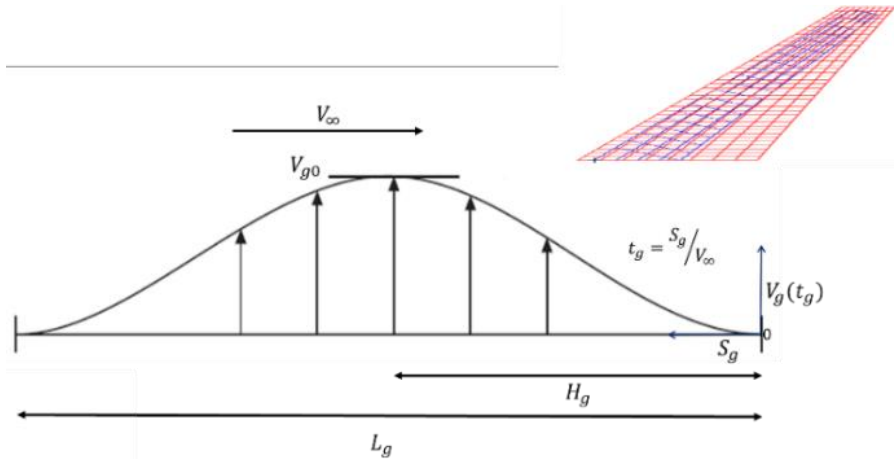
Jika analisis dilakukan menggunakan pasangan modulus getar yang berbeda, ada kemungkinan tidak ditemui kondisi ketidak stabilan. Hal ini ditandai dengan tidak adanya redaman sistem yang berubah dari negatif menjadi positif (stabil menjadi tidak stabil) dan tidak terjadinya trend mendekatnya frekuensi dua modulus yang digunakan dengan bertambahnya kecepatan pesawat. Analisis menggunakan banyak modulus dapat memperlihatkan mana pasangan modulus yang menghasilkan ketidakstabilan dinamik dan mana yang tidak.



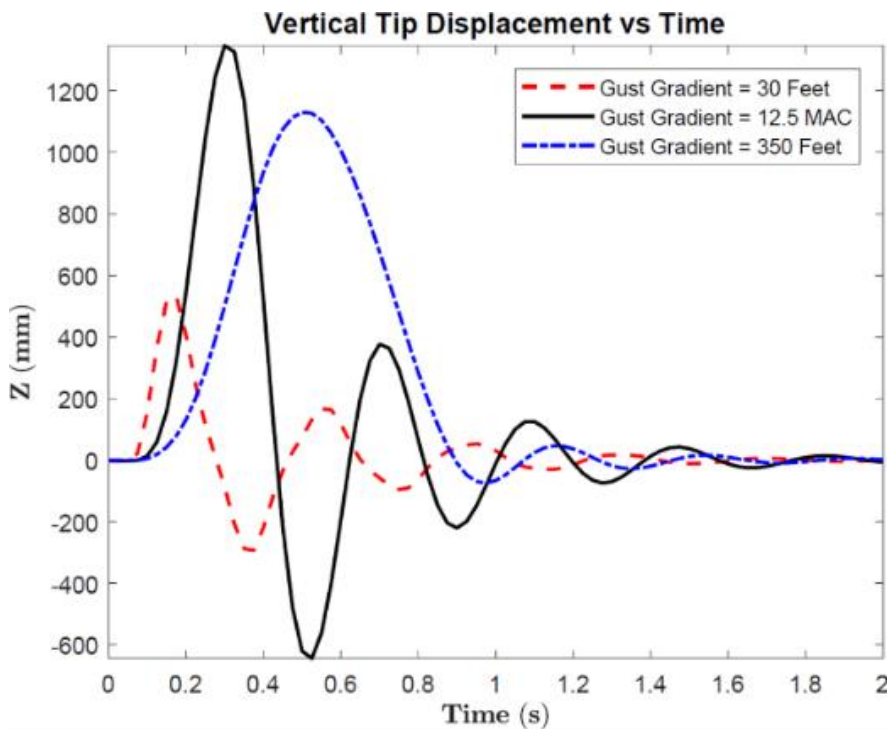
Gambar 12 Respons struktur sayap yang terbang pada kecepatan 90 m/s dan 112 m/s dan mengalami gangguan berbentuk impuls (Ramadhani, 2022)

Kasus respons dinamik pada sistem aeroelastis pesawat terbang terjadi jika pesawat mendapat gangguan luar seperti turbulensi, *gust*, atau gangguan yang terjadi saat pelepasan senjata pada pesawat tempur. Penyelesaian kasus ini dilakukan menggunakan Persamaan (2.5) di mana gaya luar mengisi suku di sisi kanan persamaan. **Gambar 12** menunjukkan contoh respons dinamik yang terjadi pada struktur sayap yang mengalami gangguan impuls pada kecepatan terbang yang berbeda (Ramadhani, 2022). Respons ini didapat dengan menyelesaikan Persamaan (2.5) dalam domain waktu. Pada kecepatan rendah, 90 m/s, gangguan awal menyebabkan respons dinamik struktur sayap menghilang terhadap waktu yang mengindikasikan respons teredam atau

sayap stabil. Namun, pada kecepatan yang lebih tinggi, 112 m/s, gangguan awal menyebabkan respons dinamik struktur membesar, yang mengindikasikan sayap dalam kondisi tidak stabil. Hal ini mengindikasikan kecepatan *flutter* sayap berada di antara 90 m/s dan 112 m/s.



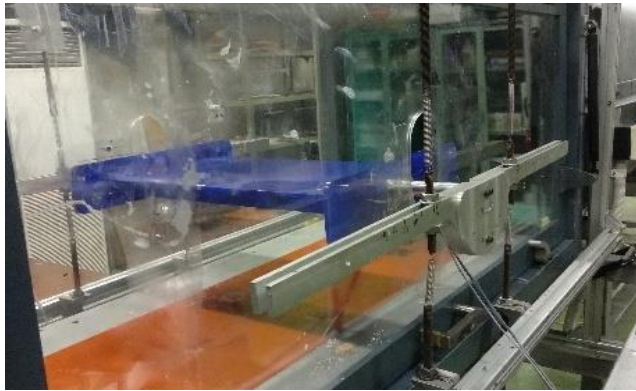
Gambar 13 Ilustrasi sayap pesawat yang terbang dan mengalami gangguan *gust* (Akbar, et al., 2022)



Gambar 14 Respons dinamik sayap saat terbang jelajah dan mengalami gangguan *gust* (Akbar, et al., 2022)

Gambar 13 menunjukkan ilustrasi sayap pesawat yang melakukan terbang jelajah dan mengalami gangguan angin *gust* vertikal dengan parameter V_{g0} dan H_g . adalah amplitudo dan interval *gradien gust*. Pada kasus ini, gaya aerodinamika yang terjadi berasal dari dua komponen, yaitu gaya yang berasal dari lingkungan dalam bentuk 1-Cosine *gust* dan gaya interaksi. Secara fisik, gangguan *gust* pada pesawat dapat dianalogikan seperti gangguan polisi tidur pada kendaraan darat. Respons dinamik sayap saat terbang jelajah dan mengalami gangguan *gust* dapat dilihat pada **Gambar 14**. Kecepatan kritis *flutter* pada dasarnya dirancang jauh diatas kecepatan terbang jelajah. Dengan demikian, respons dinamik sayap akan teredam saat mengalami gangguan *gust*. Besarnya respons/defleksi dan pola osilasi yang terjadi bergantung pada amplitudo dan interval *gradien gust*.

Pada struktur lain yang rentan mengalami gangguan akibat aliran udara, seperti jembatan bentang panjang, perbedaan mendasar dengan kasus aeroelastisitas pada sayap pesawat adalah beban aerodinamika yang terjadi. Sayap dikategorikan sebagai *streamline body* atau *lifting body*, di mana bentuk sayap dirancang untuk menghasilkan gaya angkat (*lift*). Bentuk struktur jembatan tidak ditujukan untuk menghasilkan gaya angkat dan dikategorikan sebagai *bluff body* atau *non-lifting body*. Hal ini berimplikasi pada metode evaluasi beban aerodinamika yang digunakan untuk memprediksi fenomena aeroelastisitas pada jembatan. Metode komputasional yang sederhana (*lower fidelity*) dan lazim digunakan untuk memodelkan gaya-gaya aerodinamika pada *streamline body* seperti sayap tidak dapat diimplementasikan pada *bluff body* seperti jembatan. Metode komputasional yang diperlukan untuk mengevaluasi beban aerodinamika pada *bluff body* memerlukan tingkat kompleksitas yang tinggi (*higher fidelity*) dan biaya komputasional yang mahal. Hingga saat ini, secara praktis, metode komputasional *higher fidelity* belum menjadi pilihan utama untuk mengevaluasi beban aerodinamika sistem aeroelastis jembatan. Oleh karena itu, pengujian eksperimental menggunakan model terowongan angin sering digunakan untuk evaluasi aeroelastisitas jembatan. **Gambar 15** menunjukkan pengujian menggunakan seksi uji pada terowongan angin dan **Gambar 16** menunjukkan model penuh jembatan Suramadu yang dikembangkan dan diuji oleh Fariduzzaman et al. (2004).



Gambar 15 Model seksi uji jembatan bentang panjang pada terowongan angin (Saputra, et al., 2021)



Gambar 16 Model penuh jembatan Suramadu di seksi uji *Indonesian Low Speed Wind Tunnel* (ILST) (Fariduzzaman, et al., 2004)

Salah satu metode yang masih terus dikembangkan di bidang kajian aeroelastisitas jembatan adalah metode identifikasi parameter. Melalui metode ini, pada dasarnya pengujian pada terowongan angin dilakukan untuk memperoleh data yang dapat direkonstruksi dan diolah menjadi koefisien-koefisien gaya aerodinamika, atau juga dikenal dengan *aerodynamic derivatives* atau *flutter derivatives*. *Flutter derivatives* ini menghubungkan lift dan momen aerodinamika yang bekerja pada jembatan dengan perpindahan dan

kecepatan *heaving* (*bending*) (h dan \dot{h}) serta perpindahan *pitching* (*torsion*) jembatan (α dan $\dot{\alpha}$) sebagai berikut:

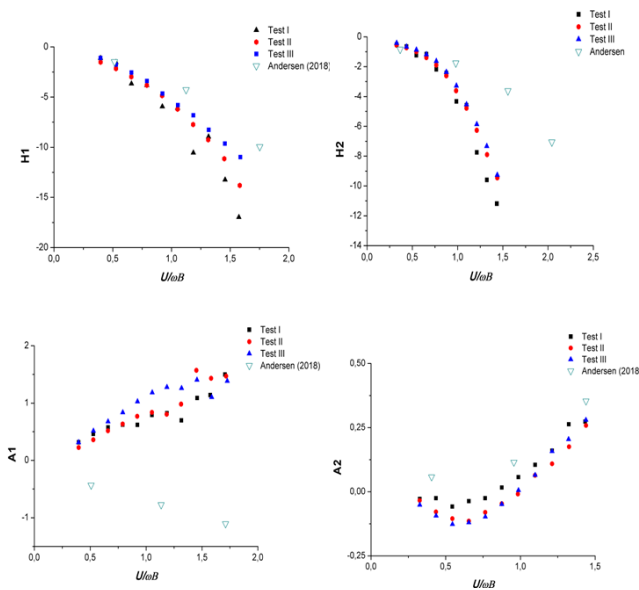
$$L_h = \frac{1}{2} \rho V^2 b \left\{ kH_1 \frac{\dot{h}}{V} + kH_2 \frac{b\dot{\alpha}}{V} + k^2 H_3 \alpha + k^2 H_4 \frac{h}{b} \right\}$$

$$M_\alpha = \frac{1}{2} \rho V^2 b^2 \left\{ kA_1 \frac{\dot{h}}{V} + kA_2 \frac{b\dot{\alpha}}{V} + k^2 A_3 \alpha + k^2 A_4 \frac{h}{b} \right\}$$
(2.7)

di mana

- | | |
|--|------------------------------|
| L_h = gaya aerodinamika | k = kecepatan reduksi |
| M_α = momen aerodinamika | ρ = massa jenis udara |
| h = derajat kebebasan <i>heaving</i> | V = kecepatan aliran udara |
| α = derajat kebebasan <i>pitching</i> | b = lebar dek jembatan |

Flutter derivatives sebagai koefisien gaya aerodinamika direpresentasikan oleh H_1, H_2, H_3 dan H_4 . Sementara untuk momen aerodinamika didefinisikan oleh A_1, A_2, A_3 dan A_4 .



Gambar 17 *Flutter derivatives* dari hasil identifikasi parameter data pengujian terowongan angin model jembatan bentang panjang (Saputra, et al., 2021)

Dengan menggabungkan kekakuan dan massa jembatan, yang relatif mudah dimodelkan, dengan parameter *flutter derivatives*, respons aeroelastis jembatan pada berbagai kecepatan angin dapat diprediksi secara numerik. Hal ini memungkinkan dilakukannya studi parametrik desain jembatan

sebelum dilakukannya pengujian *full scale* desain akhir di terowongan angin. **Gambar 17** menunjukkan data *flutter derivatives* yang diperoleh melalui metode identifikasi parameter data pengujian terowongan angin untuk model jembatan bentang panjang.

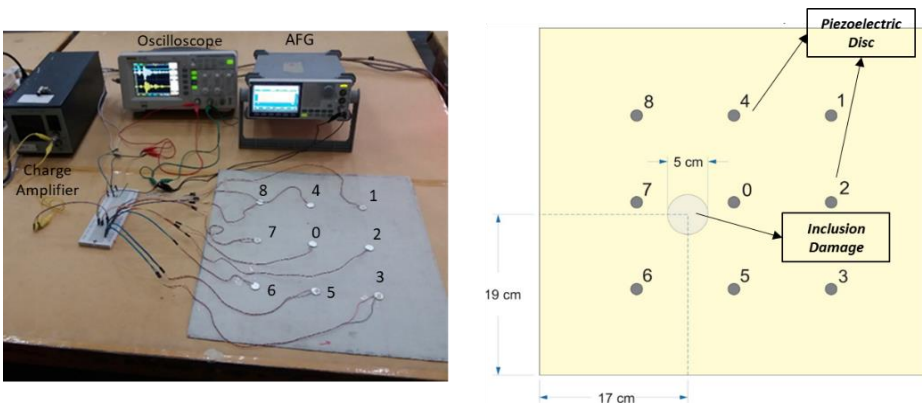
2.3 Material Maju dalam Aplikasi Dinamika Struktur

Dalam beberapa dekade terakhir, banyak dilakukan penelitian tentang material piezoelektrik dan berbagai aplikasinya dalam bidang dinamika struktur. Material piezoelektrik memiliki kemampuan untuk mengubah respons mekanik menjadi respons elektrik, atau sebaliknya. Material piezoelektrik telah banyak digunakan sebagai bagian dari sistem sensor maupun aktuator. Sebagai sensor, material piezoelektrik memberi *output* berupa tegangan listrik akibat dari pembebanan mekanik pada suatu struktur yang menghasilkan defleksi. Sementara itu, sebagai aktuator, material piezoelektrik menghasilkan regangan dan membangkitkan defleksi suatu struktur jika diberi input berupa beban elektrik. Beberapa penelitian awal tentang pemanfaatan material piezoelektrik mulai dilakukan guna mengantisipasi kemajuan aplikasi material piezoelektrik yang pesat dalam berbagai aspek di dunia.

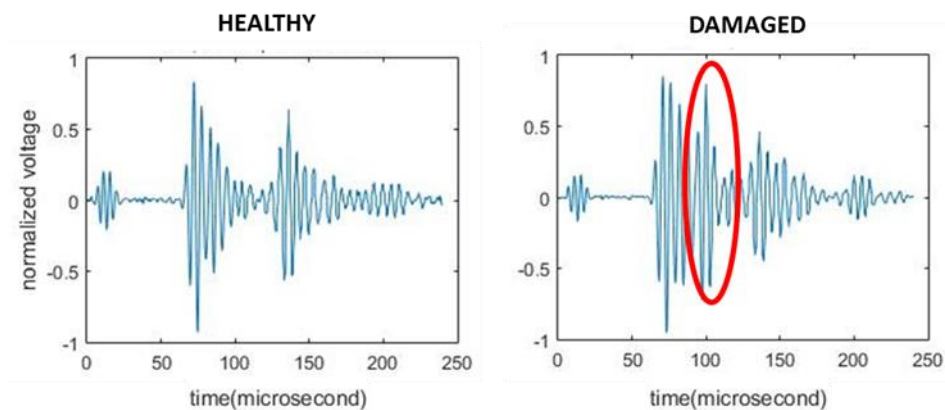
Pengembangan sistem dengan piezoelektrik sebagai sensor dan aktuator banyak dimanfaatkan untuk teknologi pemantauan kesehatan struktur (*structural health monitoring*, SHM) berbasis getaran. **Gambar 18** menunjukkan *setup* sederhana pengujian sistem SHM untuk mengetahui keberadaan cacat pada suatu pelat komposit (Gunawan, et al., 2021). Beberapa *piezoelectric patch* yang ditempelkan pada spesimen pelat komposit dapat difungsikan sebagai sensor atau aktuator. Cacat yang disimulasikan adalah cacat inklusi yang dapat juga merepresentasikan adanya delaminasi di antara lapisan komposit.

Cara kerja sistem SHM ini adalah dengan menetapkan beberapa pasangan aktuator-sensor yang kemudian dapat saling memberikan/ menerima gelombang regangan (*strain wave*). Aktuator piezoelektrik akan menerima *input* elektrik yang kemudian diubah menjadi respons mekanik dalam bentuk gelombang regangan. Sensor piezoelektrik akan menerima gelombang regangan tersebut dan mentransformasikannya menjadi *output* berupa respons elektrik (tegangan). Gelombang regangan yang muncul pada pelat

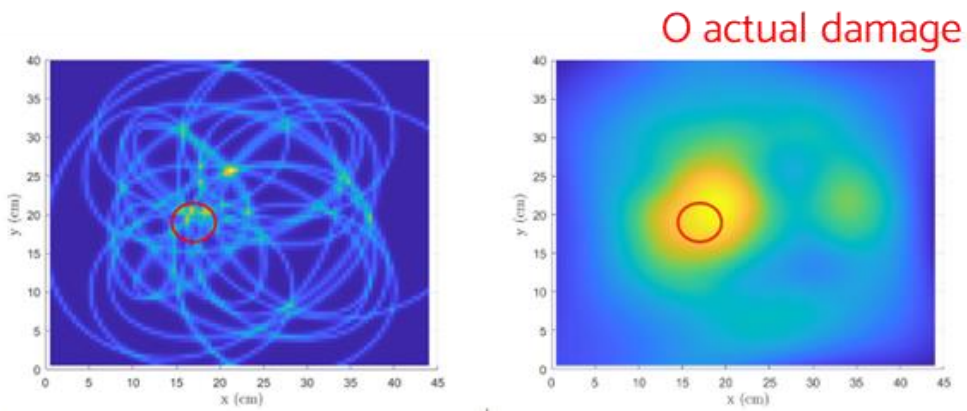
yang mengandung cacat memiliki perbedaan dengan gelombang regangan yang muncul pada pelat tanpa cacat, seperti ditunjukkan pada **Gambar 19**. Keberadaan pulsa yang baru mengindikasikan adanya pantulan dari cacat yang ada, dan informasi ini digunakan untuk memprediksi posisi cacat. Karena informasi dari satu pasangan aktuator dan sensor hanya dapat memberi estimasi posisi cacat sebagai suatu ellips, maka diperlukan paling tidak tiga pasangan aktuator-sensor untuk dapat menentukan posisi cacat dengan baik. **Gambar 20** menunjukkan berbagai posisi cacat berbentuk ellips dari berbagai pasangan sensor-aktuator. Kemungkinan keberadaan cacat ditunjukkan oleh perpotongan yang dibentuk oleh jumlah lintasan yang paling banyak (Gunawan, et al., 2021).



Gambar 18 (a) *Setup* pengujian sistem SHM berbasis piezoelektrik; (b) Ilustrasi spesimen pelat komposit dengan *inclusion damage* dan sensor/aktuator piezoelektrik (Gunawan, et al., 2021)



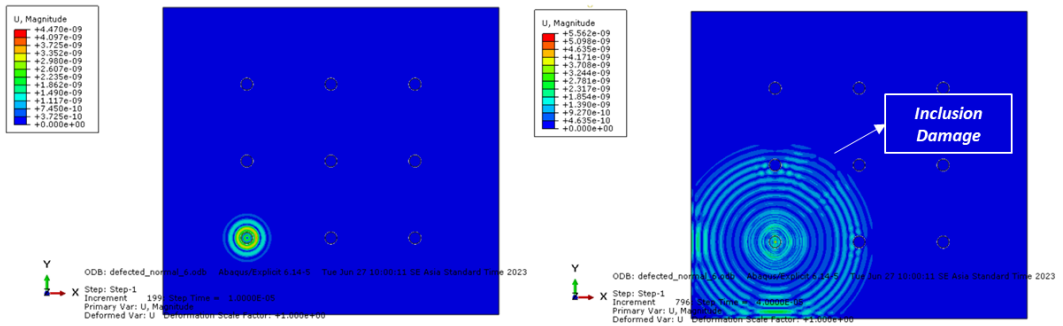
Gambar 19 Perbedaan respons sinyal melalui suatu pasangan aktuator-sensor pada pelat tanpa damage dan pelat yang memiliki damage (Gunawan, et al., 2021)



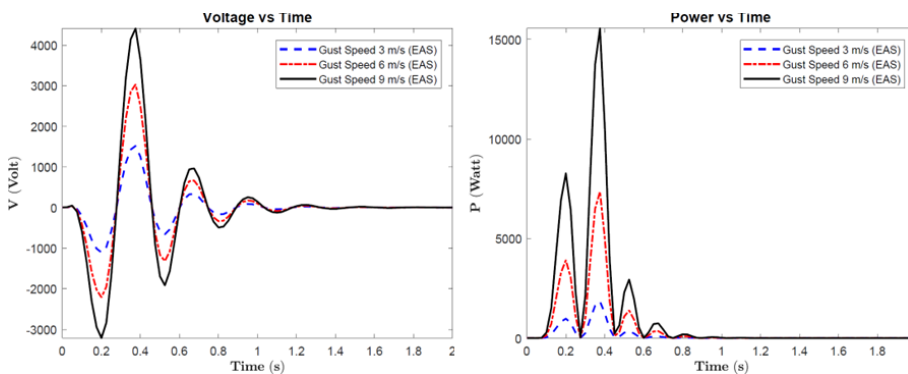
Gambar 20 (a) Ilustrasi bentuk lintasan dari berbagai pasangan aktuator-sensor dan (b) pencitraan yang dihaluskan dari perpotongan berbagai lintasan (Gunawan, et al., 2021)

Selain metode eksperimental, pengembangan di bidang komputasional dalam pemodelan struktur berbasis material maju juga terus berlanjut. Beberapa perangkat lunak komersial saat ini pun telah menyediakan berbagai modul untuk analisis piezoelektrik maupun struktur elektromekanik. **Gambar 21** menunjukkan pola rambatan gelombang regangan dari hasil simulasi komputasional menggunakan MEH. Dapat dilihat bahwa gelombang regangan merambat dari salah satu aktuator ke area permukaan pelat hingga mencapai lokasi cacat. Simulasi komputasional ini menggunakan metode komputasional maju yang dapat mengakomodir karakteristik kopling elektromekanikal struktur berbasis piezoelektrik.

Melalui kebaruan di metode komputasional, potensi-potensi aplikasi material maju dapat dieksplorasi lebih jauh. Salah satu aplikasi material maju berbasis dinamika struktur yang saat ini tengah dikembangkan di dunia adalah struktur multifungsi yang memiliki kemampuan pemanenan energi (*energy harvesting*). Pada struktur berbasis piezoelektrik, konsep pemanenan energi merupakan pengembangan lebih lanjut sensor/ aktuator. Respons dinamik/ getaran struktur dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik melalui rangkaian sistem berbasis material piezoelektrik.



Gambar 21 Perambatan *strain wave* melalui metode elemen hingga (a) sesaat setelah *input* diberikan pada aktuator dan (b) saat *strain wave* telah mencapai damage (Kevin, 2023)



Gambar 22 (a) Fungsi voltase dan (b) daya dari sayap dengan *skin* piezoelektrik saat terbang jelajah dan mengalami gangguan *gust* (Akbar, et al., 2022)

Salah satu pengembangan paling baru di bidang pemanenan energi adalah dengan menggunakan pemanenan energi *piezoaeroelastic* yang memanfaatkan respons struktur akrobat pembebanan aeroelastis. **Gambar 22** menunjukkan respons elektrik dan energi yang dapat diperoleh dari suatu sayap pesawat transport yang memiliki kulit material piezoelektrik. Salah satu kasus yang ditinjau adalah struktur sayap dalam kondisi terbang jelajah dan mengalami gangguan akrobat *gust* vertikal. Hasil simulasi dan analisis menunjukkan bahwa potensi daya yang dihasilkan dapat mencapai orde puluhan kilowatt (Akbar, et al., 2022).

3 RESPONS BENDA FLEKSIBEL AKIBAT BEBAN IMPAK DI DAERAH PLASTIS

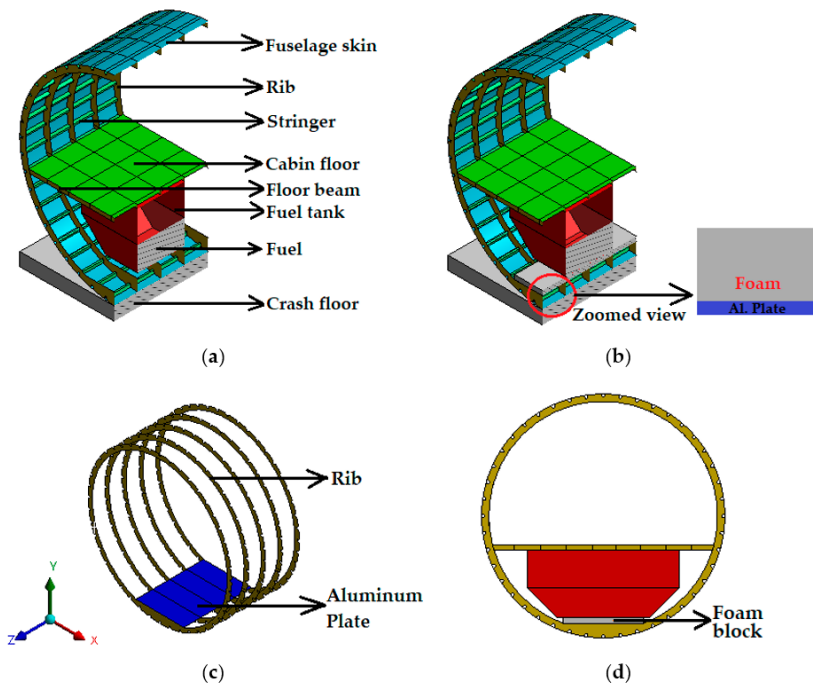
Struktur yang dikenai beban dengan amplitude tinggi akan mengalami deformasi melebihi batas elastisnya. Dalam hal ini respons akan mengalami deformasi besar di mana hubungan antara regangan dan tegangan tidak lagi berada di daerah elastis. Selain itu kasus pembebanan juga dibedakan berdasarkan seberapa cepat beban bekerja pada struktur. Hal ini perlu diperhatikan karena beberapa material memiliki perilaku yang berbeda ketika mengalami pembebanan dengan laju perubahan rendah dan ketika mengalami pembebanan dengan laju perubahan tinggi atau beban impact (*impact*).

Aspek yang dipelajari saat suatu struktur berdeformasi di daerah plastis akibat beban impact adalah bentuk deformasi plastis yang terjadi dan besar energi yang diserap. Dalam analisis kendaraan yang mengalami beban impact, kemampuan tersebut dikaitkan dengan kelaiktabrakan (*crashworthiness*) kendaraan, di mana beberapa komponen struktur kendaraan dirancang untuk mengalami deformasi plastis dan menyerap energi kinetik saat terjadi tabrakan. Keselamatan penumpang akan terjaga jika seluruh atau sebagian besar energi kinetik dapat diserap dan struktur kabin penumpang tidak mengalami deformasi yang berarti. Keselamatan penumpang dalam kabin juga ditingkatkan dengan penggunaan *seat belt* serta *airbag* supaya tidak terjadi cedera saat penumpang terbentur dengan struktur kabin di sekitarnya.

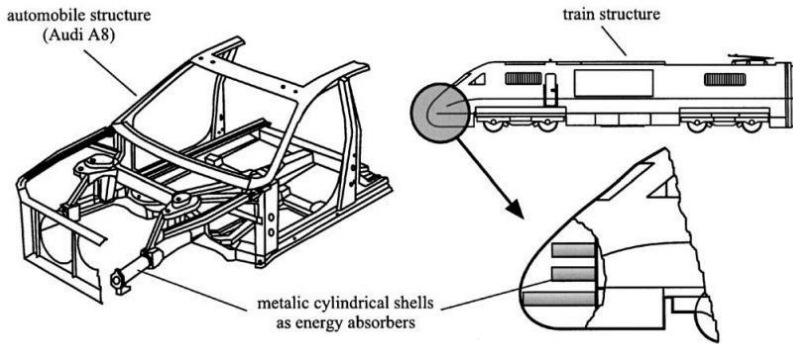
Struktur penyerap energi telah diterapkan di berbagai aplikasi. Proses penyerapan energi terjadi berdasarkan berbagai mekanisme deformasi, seperti *progressive buckling* (Jusuf, et al., 2015), *internal inversion* (Setiawan & Sari, 2010), *external inversion* (Li & You, 2018), *axial splitting* (Huang, et al., 2002), dan *tube expansion* (Shakeri, et al., 2007) (Luo, et al., 2019). Penambahan busa (*foam*) pada struktur penyerap energi yang mengalami buckling progresif (*progressive buckling*) dapat meningkatkan kemampuan penyerapan energinya (Dirgantara, 2018). Contoh penerapan struktur penyerap energi di dunia dirgantara adalah lantai fuselage pesawat yang dirancang untuk menahan beban impact yang tidak diinginkan. **Gambar 23** menunjukkan kajian yang dilakukan oleh Rayhan & Pu (2023) guna meningkatkan

crashworthiness pesawat dengan menambah busa komposit di bagian bawah *fuselage*.

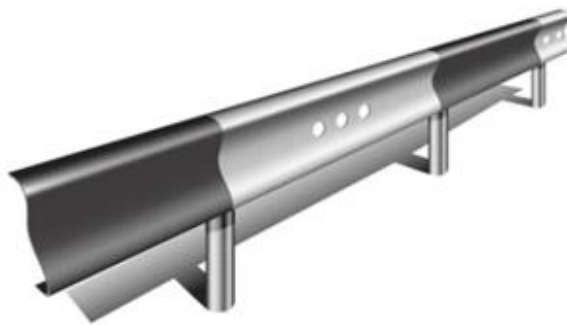
Pada kendaraan darat, struktur penyerap energi dipasang pada beberapa posisi untuk menyerap energi tabrakan dari berbagai arah yang mungkin terjadi. **Gambar 24** menunjukkan struktur penyerap energi yang dipasang pada mobil dan kereta api untuk mengantisipasi tabrakan depan. Struktur ini, yang biasa disebut sebagai *crash box*, dirancang untuk menyerap energi saat kendaraan terkena beban impact. Untuk menyerap energi saat terjadi tabrakan samping, pada pintu mobil dipasang *side impact beam* yang menjaga intrusi ke dalam kabin penumpang sekecil mungkin dan menyerap energi kinetik tabrakan melalui proses bending plastis (Long, et al., 2019). Struktur penyerap energi juga diterapkan pada *traffic barriers* seperti ditunjukkan pada **Gambar 25** (disebut juga *guardrails* di Amerika Utara atau *crash barrier* di Inggris). Struktur ini berfungsi untuk menjaga kendaraan dalam jalur mereka dan mencegah terjadinya tabrakan dengan benda-benda yang berbahaya di sekitar jalan raya seperti rambu lalu lintas, pohon, bangunan, tembok, dll..



Gambar 23 Model yang dipelajari oleh Rayhan & Pu (2023): (a) Desain *fuselage* konvensional; (b) Desain dengan perbaikan penyerap energi yang diusulkan; (c) Skeleton view desain yang diusulkan; (d) Tampak depan desain yang diusulkan.



Gambar 24 Crash box pada mobil dan kereta api



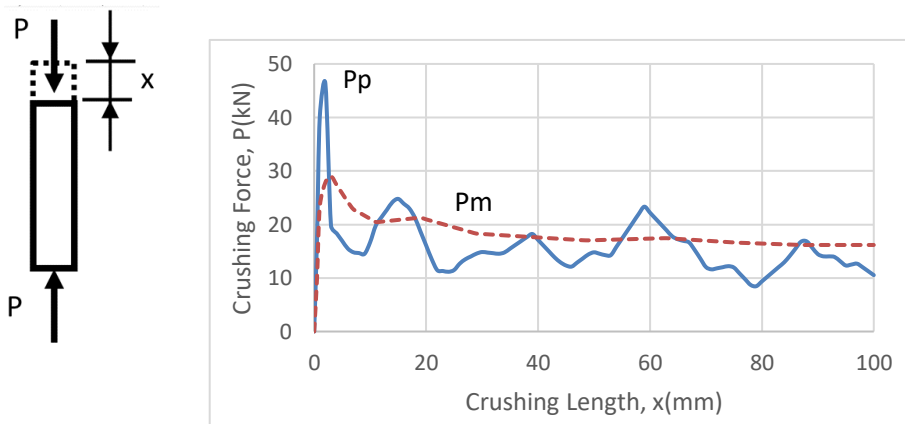
Gambar 25 Road traffic barrier (Shutterstock, Inc., 2024)

Penelitian respons benda fleksibel terhadap beban impact tinggi dimulai dengan kajian struktur kolom prismatik yang akan mengalami *buckling* progresif jika terkena beban impact dalam arah aksial. Struktur ini dipilih karena bentuknya sederhana dan ringan sehingga cocok digunakan untuk aplikasi yang memerlukan massa minimum. Namun demikian ada kelemahan sistem ini, yaitu bahwa gaya impact berfluktuasi sebagai akibat dari pembentukan lipatan-lipatan dalam proses deformasi. Gaya impact yang berfluktuasi akan mengakibatkan perlambatan yang berfluktuasi secara proporsional terhadap gaya penghancur. Hal ini tidak menguntungkan karena nilai perlambatan rata-rata akan berada di bawah nilai perlambatan maksimum sedangkan nilai perlambatan maksimum harus dibatasi pada tingkat yang aman terhadap penumpang kendaraan. Semakin seragam perlambatan yang dialami akan semakin baik karena nilai perlambatan rata-rata akan mendekati nilai perlambatan maksimum. **Gambar 26** menunjukkan kurva beban vs perpindahan saat kolom prismatik mengalami *progressive buckling* akibat beban aksial.

Berdasarkan kurva gaya penghancur vs deformasinya, kinerja *crash box* dievaluasi menggunakan beberapa parameter sebagai berikut:

- a. Penyerapan Energi (*Energy Absorption, EA*), yaitu besar energi yang diserap oleh *crash box* selama proses deformasi, dan dihitung dari luas daerah di bawah kurva P vs x :

$$EA = \frac{1}{x_{max}} \int_0^{x_{max}} P(x) dx \quad (3.1)$$



Gambar 26 Gaya penghancur vs jarak *crushing*

- b. Gaya Penghancur Rata-rata (*Mean Crushing Force, P_m*) adalah rata-rata gaya penghancur selama proses deformasi dan dihitung sebagai berikut:

$$P_m = \frac{EA(x_{max})}{x_{max}} \quad (3.2)$$

Pada deformasi besar, diharapkan nilai P_m sudah mencapai suatu harga konstan tertentu.

- c. Gaya Penghancur Puncak (*Peak Crushing Force, P_p*), adalah gaya penghancur terbesar yang terjadi selama proses deformasi.
- d. Penyerapan Energi Spesifik (*Specific Energy Absorption, SEA*) merupakan besar energi yang diserap per satuan massa. Parameter ini berguna untuk mengevaluasi efisiensi *crash box* dan membandingkan kemampuan serap energi berbagai jenis *crash box* untuk massa yang sama.

$$SEA = \frac{EA(x_{max})}{m_{def}} \quad (3.3)$$

- e. Efisiensi Gaya Penghancur (*Crushing Force Efficiency*, CFE) menyatakan rasio antara gaya penghancur rata-rata dengan gaya penghancur maksimum. Nilai CFE diharapkan mendekati 1, yaitu jika nilai P_p dekat dengan nilai P_m . Hal ini mengindikasikan bahwa crash box akan memperlambat kendaraan saat tabrakan terjadi secara seragam.

$$CFE = \frac{P_m}{P_p} \quad (3.4)$$

Data gaya impact vs deformasi suatu struktur yang didapat melalui eksperimen impact sangat bermanfaat dalam mengevaluasi kinerja penyerapan energinya. Karena eksperimen memerlukan biaya yang tidak murah dan waktu persiapan serta pelaksanaan yang panjang, simulasi numerik impact yang divalidasi menggunakan data eksperimen merupakan suatu alternatif sangat berguna dalam kajian kinerja penyerapan energi suatu struktur. Semakin majunya perangkat dan metode komputasi memungkinkan simulasi numerik dilakukan dalam waktu yang relatif singkat dan berbagai simulasi dapat dilakukan untuk mendapatkan data yang komprehensif.

Untuk dapat melakukan analisis kemampuan penyerapan energi suatu struktur secara numerik maupun analitik, diperlukan model yang dapat merepresentasikan struktur dengan baik. Salah satu parameter penting adalah data tegangan vs regangan material pada berbagai kondisi, yaitu:

- a. daerah regangan yang besar
- b. laju pembebanan yang berbeda-beda

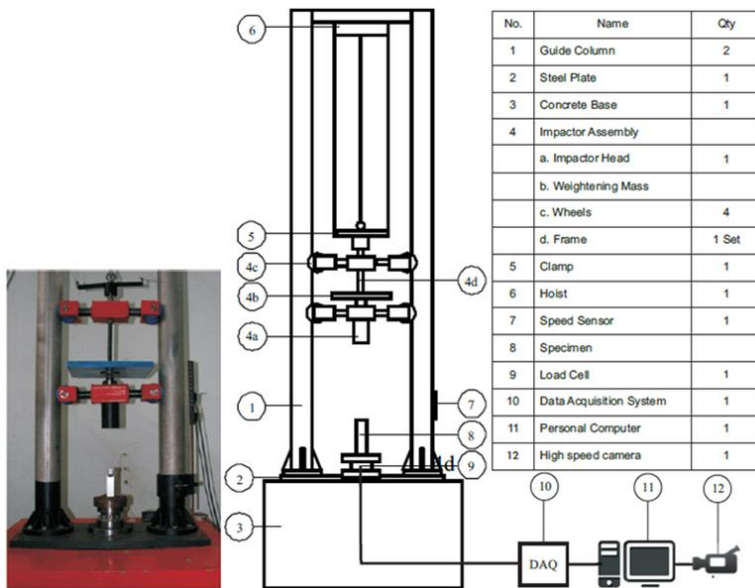
Di luar dua kondisi tersebut, diperlukan juga data pengaruh temperatur terhadap kurva tegangan-regangan material. Dalam penelitian yang dilakukan hingga saat ini hal tersebut belum dilakukan dan merupakan salah satu aspek yang perlu dilakukan berikutnya.

Penelitian telah dilakukan dalam berbagai aspek, mulai dari pengembangan alat uji impact (*Dropped Weight Impact Testing Machine*), pengembangan alat uji sifat material pada laju regangan tinggi (*Split Hopkinson Pressure Bar*), pengembangan model numerik dalam berbagai aplikasi mekanika impact seperti *crash box*, analisis beban ledakan pada kendaraan tempur, dan perancangan kelaiktabrakan (*crashworthiness*) kereta api.

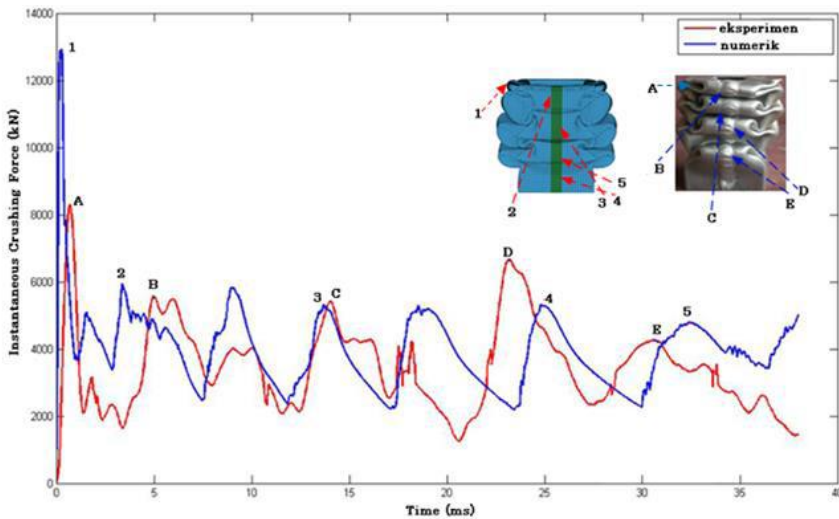
3.1 Pengukuran Gaya dan Deformasi

Data pengukuran gaya dan deformasi saat suatu struktur dikenai beban impact digunakan untuk mengembangkan dan memvalidasi model MEH yang mampu mensimulasikan fenomena tersebut dengan baik. **Gambar 27** menunjukkan alat uji impact (*Dropped Weight Impact Machine*) yang telah dikembangkan di Laboratorium Struktur Ringan FTMD. Pada prinsipnya alat ini terdiri atas sistem pengimpak (*impactor assembly*) dan kolom pengarah (*guide columns*), dengan instrumentasi yang terdiri atas *loadcell* yang terletak di bawah spesimen, sistem pengakuisisi data, sensor kecepatan, dan kamera kecepatan tinggi. Sistem pengimpak dapat dilepaskan dari ketinggian tertentu, sesuai dengan kecepatan impact spesimen uji yang diinginkan. Sensor kecepatan dipasang untuk mengukur kecepatan pengimpak sesaat sebelum mengenai spesimen. *Loadcell* digunakan untuk mengukur beban yang terjadi selama proses deformasi. Alat uji impact yang dikembangkan masih memiliki keterbatasan, yaitu kecepatan impact sekitar 9.9 m/s, massa pengimpak maksimum 150 kg, dan pengukuran beban impact tidak dapat melebihi 70 kN (Gunawan, et al., 2011). Sistem akuisisi data digunakan untuk mencuplik data *loadcell* dan mengirimkannya ke komputer. Kamera kecepatan tinggi digunakan untuk merekam proses deformasi yang terjadi. Karena kejadian impact untuk ukuran spesimen yang dapat diuji menggunakan alat ini berlangsung sangat cepat, dalam orde 20 ms, maka laju pencuplikan (*sampling rate*) sistem pengakuisisi data dan kecepatan kamera harus dapat merekam dalam waktu singkat tersebut. Laju pencuplikan minimum sistem pengakuisisi data yang digunakan minimum 10 kHz dan kecepatan rekam kamera minimum 1200 *frame per second* (fps).

Alat uji impact ini telah diverifikasi kinerjanya melalui uji fungsional dengan cara melakukan perbandingan hasil pengujian dan simulasi MEH kasus impact kolom berpenampang bujur sangkar dengan keliling 112 mm. **Gambar 28** menunjukkan kesesuaian data simulasi dan data eksperimen berupa gaya impact terhadap waktu dan bentuk deformasi untuk kasus impact pada kolom dengan penampang bujur sangkar (Gunawan, et al., 2011). Hal ini menunjukkan bahwa alat uji yang telah dibuat dapat digunakan untuk melakukan pengukuran gaya impact dengan baik.



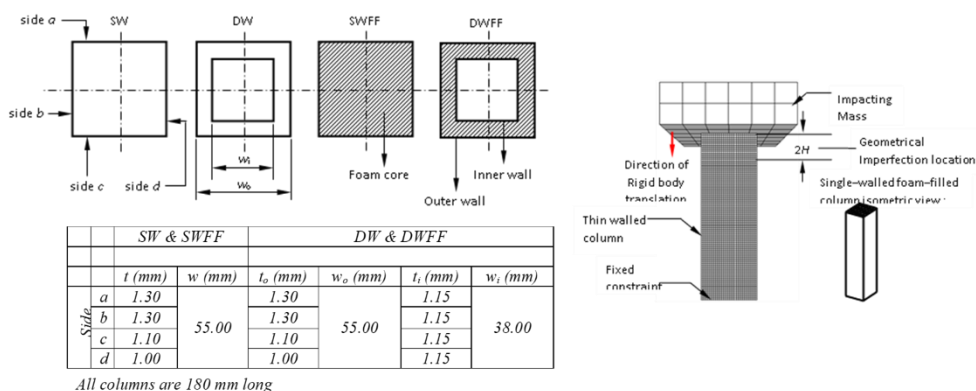
Gambar 27 Dropped weight impact testing machine yang dikembangkan di LSR FTMD



Gambar 28 Gaya impact pada kolom bujur sangkar dengan keliling 112 mm yang didapat dari pengujian dan simulasi MEH (Gunawan, et al., 2011)

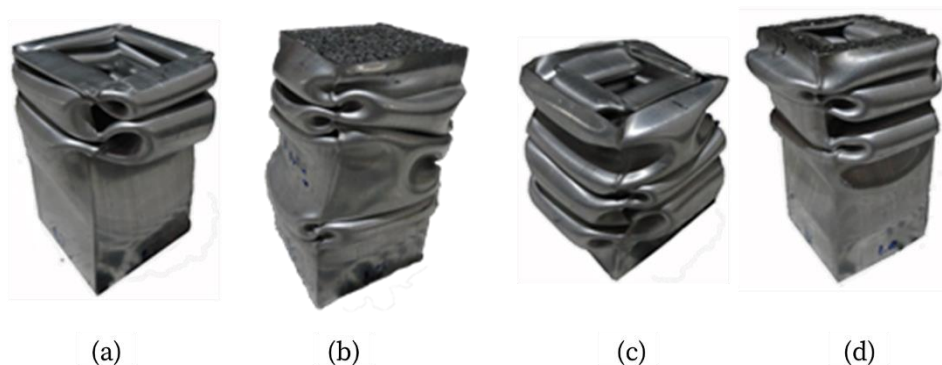
Pengujian selanjutnya dilakukan dengan menggunakan kamera kecepatan 1200 fps untuk merekam gaya impact dan gambar deformasi kolom terhadap waktu yang dapat diolah menjadi data panjang deformasi vs waktu. Data gaya vs waktu dan deformasi vs waktu kemudian dapat diolah menjadi gaya vs deformasi, yang diperlukan dalam analisis penyerapan energi oleh kolom.

Studi dilakukan terhadap 4 kolom dengan konfigurasi *single-walled* (SW), *single-walled foam filled* (SWFF), *double-walled* (DW), dan *double-walled foam filled* (DWFF) (Gunawan, et al., 2013). **Gambar 29** menunjukkan detail geometri 4 kolom yang digunakan dalam studi serta model tipikal MEH kolom-kolom tersebut. **Gambar 30** menunjukkan deformasi ke empat kolom yang didapat dari pengujian dan **Gambar 31** menunjukkan deformasi hasil simulasi MEH. Dapat dilihat bahwa terdapat kesesuaian yang baik antara hasil pengujian dan simulasi. Perbandingan kurva gaya impact vs deformasi hasil pengujian dan hasil simulasi ditunjukkan pada **Gambar 32** untuk empat kolom tersebut. Dapat dilihat bahwa pengujian dan simulasi dapat memberi kurva gaya impact vs deformasi dengan kesesuaian yang baik.

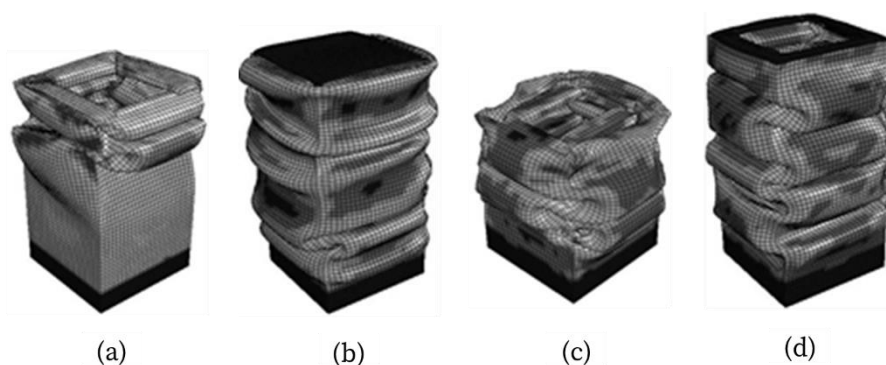


Gambar 29 Geometri 4 kolom yang digunakan dalam pengembangan prosedur pengukuran gaya terhadap deformasi dan model MEH tipikal untuk kolom (Gunawan, et al., 2013)

Hasil-hasil ini menunjukkan bahwa alat uji impact yang dikembangkan dapat digunakan untuk mengukur kurva gaya vs deformasi yang selanjutnya digunakan untuk memvalidasi model numerik yang diteliti. Beberapa penyempurnaan telah dilakukan untuk mendapatkan sistem yang lebih handal. *Loadcell* yang pada awalnya dikembangkan sendiri dan berfungsi dengan baik diganti dengan sistem yang tersedia secara komersial. Penyempurnaan lain adalah perancangan sistem impact yang lebih baik sehingga alat uji impact ini dapat digunakan untuk menguji spesimen dengan gaya maksimum 90 kN (Trong, et al., 2014), serta penggunaan kamera yang lebih baik dan dapat merekam gambar deformasi dengan kecepatan 5000 fps.

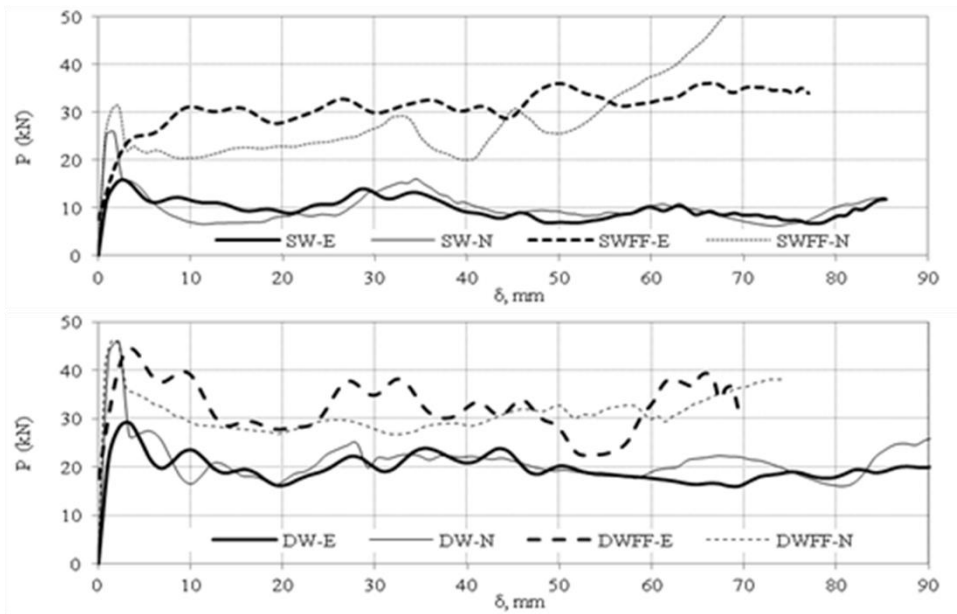


Gambar 30 Deformasi kolom (a) SW, (b) SWFF, (c) DW, dan (d) DWFF dari hasil pengujian (Gunawan, et al., 2013)



Gambar 31 Deformasi kolom (a) SW, (b) SWFF, (c) DW, dan (d) DWFF dari hasil simulasi menggunakan MEH (Gunawan, et al., 2013)

Berbagai penelitian telah dilakukan dengan memanfaatkan alat ini untuk memvalidasi model FEM yang selanjutnya digunakan untuk melakukan studi ‘parametrik respons *crash box* dengan berbagai geometri penampang secara numerik. **Gambar 33** menunjukkan hasil simulasi MEH untuk beberapa tabung silindris terbuka yang divalidasi secara eksperimen (Kumar, et al., 2018). Selanjutnya dengan model yang telah divalidasi, dilakukan simulasi dan eksperimen pembebanan impak terhadap tabung dengan penutup setengah bola (*hemispherical capped tubes*) dan didapat model MEH yang dapat memprediksi hasil pengujian dengan sangat baik, seperti ditunjukkan pada **Gambar 34** (Kumar, et al., 2019).



Gambar 32 Kurva gaya impact vs deformasi untuk kolom SW, SWFF, DW, DWFF yang didapat dari eksperimen (E) dan dari simulasi MEH (N)



Gambar 33 Deformasi plastis pada open cylindrical tube yang diperoleh secara (a) numerikal dan (b) eksperimen (Kumar, et al., 2018)

(a) Numerical



H1S specimen

H2S specimen

H3S specimen

(b) Experimental

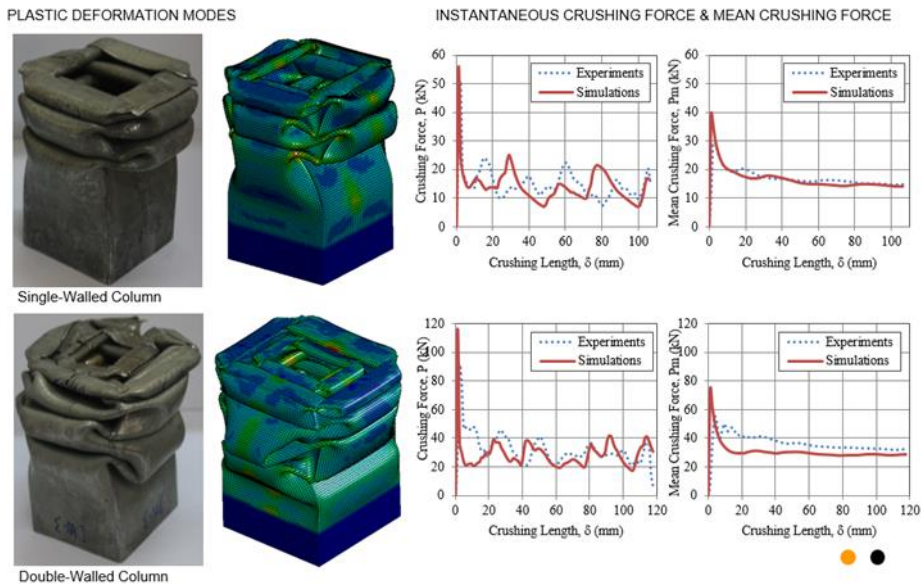


H1S specimen

H2S specimen

H3S specimen

Gambar 34 Deformasi plastis pada specimen tabung dengan penutup setengah bola (Kumar, et al., 2019)



Gambar 35 Perbandingan hasil uji impact dengan hasil simulasi numerik menggunakan MEH (Jusuf, et al., 2015)

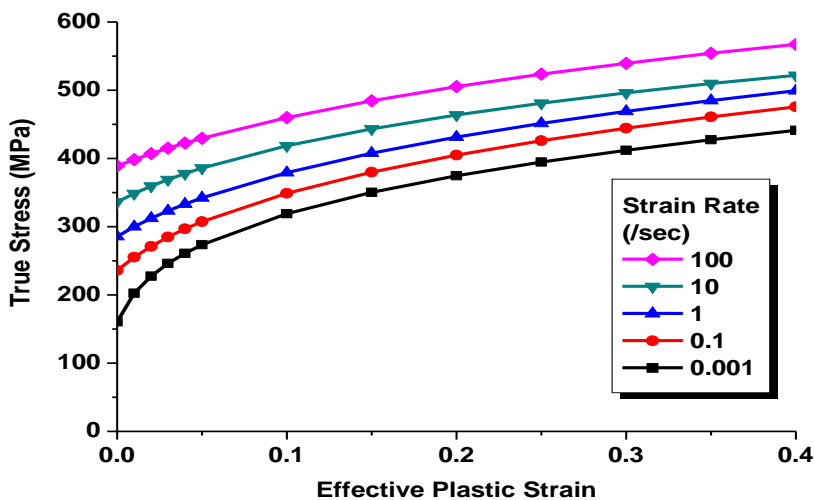
Karena alat uji impact yang dikembangkan memiliki keterbatasan kecepatan impact, massa sistem pengimpact maksimum, dan pengukuran beban impact, untuk studi yang memerlukan kecepatan impact yang lebih tinggi, dilakukan pengujian menggunakan *Horizontal Hydraulic Impact Testing Machine* milik *Computational Solid Mechanics and Design (CSMD) Laboratory-KAIST* yang mampu memberi beban impact dengan kecepatan hingga 21 m/s dan massa pengimpact 290 kg. **Gambar 35** menunjukkan hasil pengujian dibandingkan dengan hasil simulasi menggunakan MEH (Jusuf, et al., 2015). Dapat dilihat bahwa kualitas hasil-hasil yang diperoleh menggunakan peralatan di tempat lain tidak berbeda jauh dengan kualitas hasil-hasil yang didapat menggunakan alat yang dikembangkan di FTMD.

3.2 Pengujian Sifat Material pada Laju Regangan Tinggi

Sifat material yang mengalami pembebanan yang berubah dengan cepat dalam waktu yang singkat, atau mengalami pembebanan pada laju regangan tinggi, merupakan salah satu aspek penting dalam analisis dan simulasi numerik respons struktur terhadap beban impact. Beberapa jenis material yang diuji pada laju regangan tinggi memiliki kurva tegangan-regangan yang berbeda dengan kurva yang diukur pada kondisi quasi-statik, dan dikenal sebagai material yang sensitif terhadap laju regangan (*strain rate sensitive material*). Beberapa jenis paduan aluminium merupakan material yang tidak sensitif terhadap laju regangan, sedangkan beberapa jenis paduan baja merupakan material yang sensitif terhadap laju regangan (Tanimura, et al., 2009). **Gambar 36** menunjukkan kurva tegangan-regangan untuk material ST 37 pada beberapa laju regangan, yang menunjukkan bahwa kurva bergeser ke arah yang lebih tinggi jika material dibebani dengan laju regangan yang semakin tinggi. Jika sifat ini tidak diperhitungkan dalam prediksi respons struktur terhadap beban impact yang terjadi dengan cepat atau pada laju regangan tinggi, maka prediksi gaya penghancur yang diperlukan akan lebih rendah daripada yang sesungguhnya. Oleh karena itu pemahaman dan kemampuan untuk mengukur sifat material pada laju regangan tinggi diperlukan untuk mendapatkan model numerik yang akan menghasilkan prediksi yang baik.

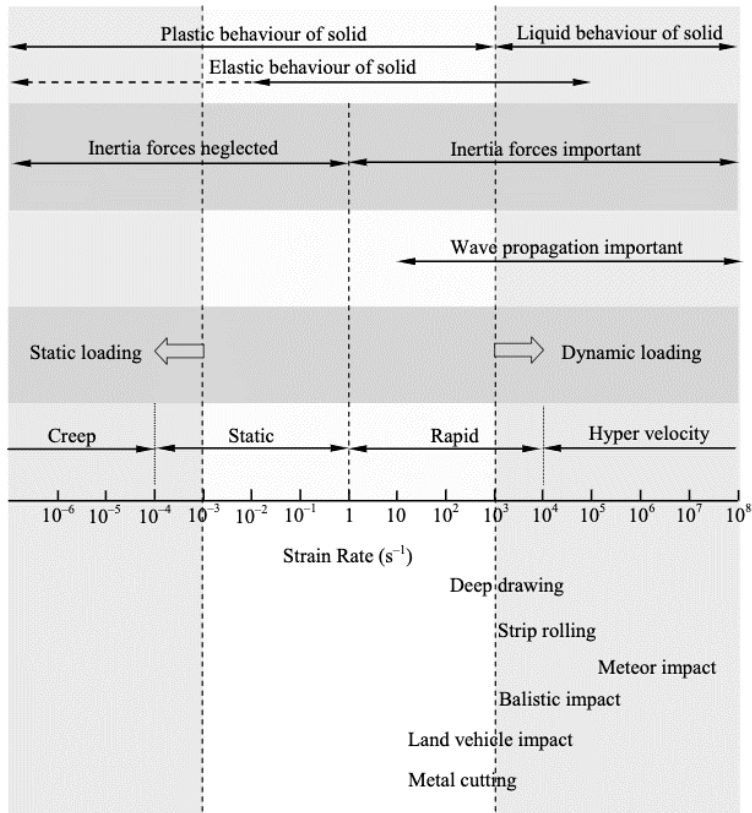
Pada dasarnya fenomena laju regangan ini dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa bagian berdasarkan jenis pembebanannya, seperti yang

ditampilkan pada **Gambar 37**. Pertama, kondisi pembebanan statik terjadi pada rentang laju regangan rendah, yakni $10^{-6} - 10^{-3}$ /s. Pada kondisi ini, pengaruh gaya-gaya inersia dapat diabaikan. Kedua, kondisi pembebanan dinamik terjadi pada rentang laju regangan tinggi, yakni $10^3 - 10^8$ /s. Pada kondisi ini, pengaruh dari gaya-gaya inersia menjadi penting. Beberapa contoh fenomena fisik yang terjadi pada kondisi laju regangan tinggi ini adalah *explosive welding*, *deep drawing*, dan *ballistic impact*. Ketiga, kondisi pembebanan yang berada di antara pembebanan statik dan dinamik yang disebut sebagai fenomena laju regangan medium, terjadi pada rentang $10^{-3} - 10^3$ /s. Terdapat sejumlah fenomena fisik yang terjadi pada rentang laju regangan ini, di antaranya impak pada kendaraan dan pemotongan logam (*metal cutting*).



Gambar 36 Kurva tegangan-regangan material yang sensitif terhadap laju regangan (Pulungan, 2010)

Pengukuran sifat mekanik material pada laju regangan tinggi pada umumnya dilakukan menggunakan Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB). Alat ini pertama kali dikembangkan oleh John Hopkinson pada tahun 1870-an dan masih terus dikembangkan untuk berbagai keperluan hingga saat ini (Hopkinson, 1872) (Hopkinson, 1872) (Kolsky, 1949) (Robertson, et al., 1971) (Kaiser, 1998) (Gallina, et al., 2003) (Haines, et al., 2007) (Tasneem, 2005) (Chen & Song, 2011). SHPB mampu mengukur kurva tegangan-regangan material pada tingkat regangan tinggi $500-10^4$ /s (Chen & Song, 2011) (Dunand, et al., 2012) (Park, et al., 2014) (Afdhal, et al., 2014) (Afdhal, et al., 2021).

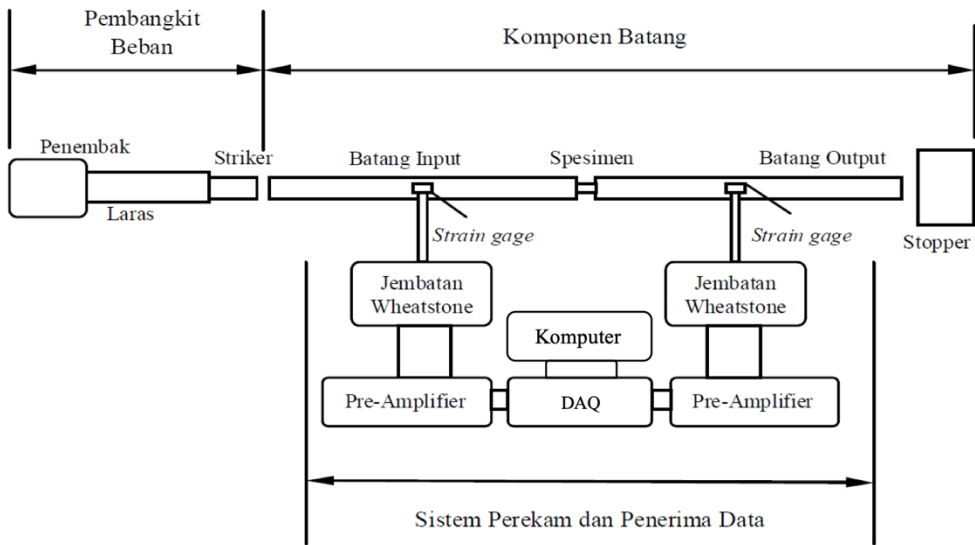


Gambar 37 Jenis-jenis pembebanan berdasarkan nilai laju regangan (Macaulay, 1987)

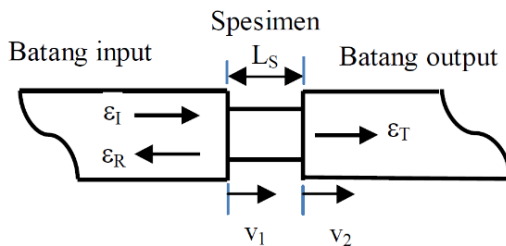
Gambar 38 menunjukkan skema SHPB, yang terdiri atas tiga bagian utama, yaitu pembangkit beban, sistem batang, serta sistem perekam dan penerima data (Gunawan, et al., 2012). Sistem batang sebagai sistem inti SHPB terdiri atas batang striker (*striker bar*), batang *input* (*incident bar*), dan batang *output* (*transmitter bar*). Spesimen uji diletakkan di antara batang *input* dan batang *output*. Ketiga bar dibuat dari material yang sama dengan diameter yang juga sama. Kekuatan material bar harus jauh lebih tinggi daripada kekuatan spesimen karena selama pengujian batang harus tetap berada dalam kondisi elastis saat spesimen mengalami deformasi plastis.

Prinsip dasar cara kerja SHPB adalah batang striker ditembakkan ke arah batang *input*, yang akan membangkitkan gelombang regangan tekan uniaksial pada batang *input* (ϵ_I). Gelombang tersebut akan merambat menuju spesimen pada ujung lain batang *input*. Sebagian gelombang regangan tekan akan dipantulkan kembali ke batang *input* dalam bentuk gelombang regangan tarik

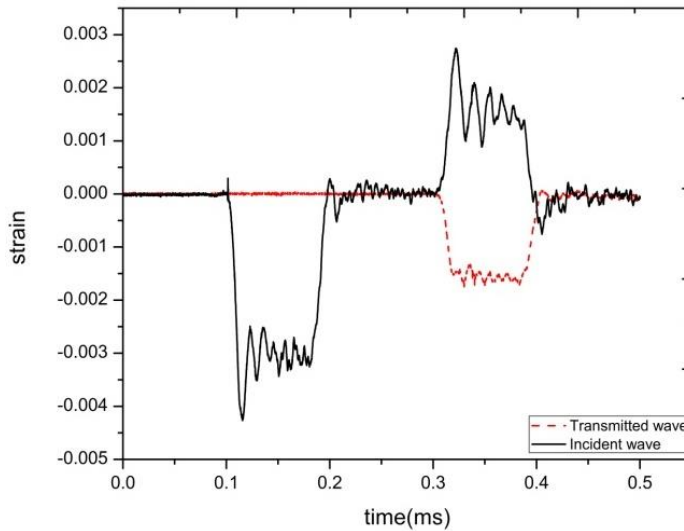
(ϵ_R) dan sebagian lainnya diteruskan ke spesimen dan selanjutnya ke batang output dalam bentuk gelombang regangan tekan (ϵ_T), seperti diilustrasikan pada **Gambar 38**. Gelombang regangan ϵ_I dan ϵ_R pada batang *input* dan ϵ_T pada batang *output* direkam oleh sistem instrumen yang menggunakan *strain gages* yang ditempel pada kedua batang tersebut. **Gambar 39** menunjukkan contoh plot tiga gelombang regangan terhadap waktu sebagai hasil dari pengujian menggunakan SHPB. Parameter *input* dalam pengujian SHPB adalah panjang dan kecepatan batang striker yang menentukan panjang dan tinggi gelombang regangan yang terjadi.



Gambar 38 Skema alat *Split Hopkinson Pressure Bar*



Gambar 39 Ilustrasi gelombang regangan pada batang input menuju spesimen yang terdiri atas gelombang datang (ϵ_I) dan gelombang pantulan (ϵ_R) serta gelombang yang diteruskan ke batang *output* (ϵ_T)



Gambar 40 Contoh gelombang datang (*incident wave*), dan pantulan (*reflected*) serta terusan (*transmitted*) yang diukur dari strain gage (Afdhal, et al., 2014)

Dari hasil pengujian menggunakan SHPB dalam bentuk tiga gelombang regangan tersebut, dilakukan perhitungan laju regangan terhadap waktu ($\dot{\epsilon}_S(t)$), stress pada spesimen terhadap waktu ($\epsilon_S(t)$), dan regangan spesimen terhadap waktu ($\sigma_S(t)$) menggunakan persamaan berikut (George T. (Rusty) Gray, 2000):

$$\dot{\epsilon}_S(t) = -\frac{2C_B}{L_S} \epsilon_R(t) \quad (3.5)$$

$$\epsilon_S(t) = -\frac{2C_B}{L_S} \int_0^t \epsilon_R(t) dt \quad (3.6)$$

$$\sigma_S(t) = \frac{A_B}{A_S} E_B \epsilon_T(t) \quad (3.7)$$

di mana:

$\epsilon_R(t)$: regangan yang diukur pada batang output,

$\dot{\epsilon}_S(t)$: laju regangan spesimen,

$\epsilon_S(t)$: regangan spesimen,

$\sigma_S(t)$: tegangan spesimen,

C_B : laju gelombang elastis pada batang,

L_S : panjang batang striker,

A_B : luas penampang batang,

A_S : luas penampang spesimen,

E_B : modulus Young batang.

Persamaan (3.5), (3.6), dan (3.7) diturunkan dengan asumsi bahwa gelombang yang terjadi pada komponen batang dan spesimen adalah gelombang 1 dimensi, dan ukuran spesimen kecil sehingga gelombang regangan melewati spesimen dalam waktu yang lebih kecil dibandingkan dengan waktu perambatan gelombang pada batang input dan output.

Dari hasil perhitungan menggunakan Persamaan (3.5) dan (3.6), yaitu data $\dot{\epsilon}_S(t)$ dan $\epsilon_S(t)$, dapat dibentuk kurva $\dot{\epsilon}_S - \epsilon_S$, laju regangan sebagai fungsi dari regangan yang terjadi. Dari hasil perhitungan menggunakan Persamaan (3.7) dan (3.6), yaitu data $\sigma_S(t)$ dan $\epsilon_S(t)$, dapat dibentuk kurva $\sigma_S - \epsilon_S$, tegangan dan regangan yang terjadi. Sebagai ilustrasi perhitungan kurva regangan vs tegangan dan laju regangan, digunakan data gelombang regangan yang didapat dari simulasi numerik pengujian SHPB menggunakan MEH untuk SHPB dengan sistem batang terbuat dari baja 4340 dengan panjang batang *input* dan *output* masing-masing 1 m, panjang bar striker 0.128 m, dan diameter semua batang 25 mm (Gunawan, et al., 2012). Spesimen terbuat dari material DDQ (Pulungan, 2010) dengan diameter 7 mm dan tebal 6 mm. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *input* kecepatan batang striker 64 m/s. **Gambar 41** menunjukkan gelombang datang dan pantul yang diamati pada batang *input* dan gelombang regangan yang diteruskan dan diamati pada batang *output*. **Gambar 42** menunjukkan masing-masing gelombang regangan yang telah diisolasi dan digunakan untuk menghitung sifat material menggunakan Persamaan (3.5), (3.6), dan (3.7). **Gambar 43** menunjukkan hasil perhitungan berupa kurva laju regangan, tegangan, dan regangan sebagai fungsi waktu. Tiga kurva tersebut kemudian diproses lebih lanjut untuk menghasilkan kurva laju regangan-regangan dan tegangan-regangan, seperti ditunjukkan pada **Gambar 44** (Gunawan, et al., 2012).

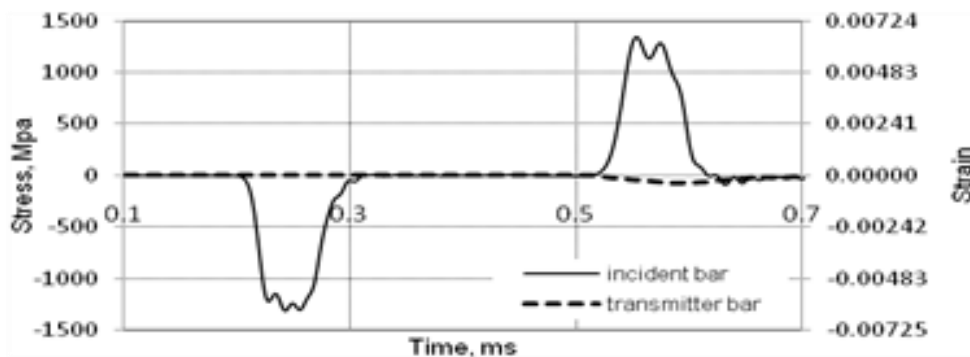
Pemodelan perilaku *strain rate sensitive material* pada simulasi numerik MEH, seperti pada kasus SHPB, dapat dilakukan menggunakan beberapa model material, di antaranya Cowper-Symond dan Johnson-Cook. Dua model material ini telah digunakan secara luas dalam kasus-kasus viskoplastis, di mana nilai tegangan dapat berubah seiring perubahan nilai laju regangan. Model Cowper-Symonds dibangun berdasarkan persamaan empirik yang dikembangkan oleh Cowper dan Symonds pada tahun 1957. Model material ini dapat digunakan dalam memprediksi perilaku viskoplastis material dengan menghubungkan nilai kekuatan *yield* dinamik dan kekuatan *yield* statik menggunakan dua parameter, D dan q, seperti ditunjukkan pada

Persamaan (3.8). Model material ini memiliki formulasi yang cukup sederhana di mana nilai kekuatan *yield* dimodifikasi oleh dua parameter konstan.

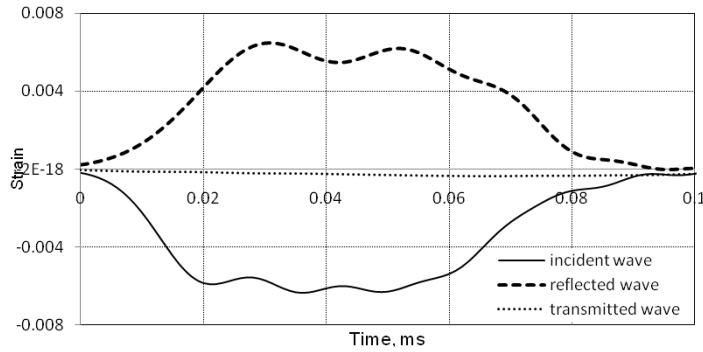
$$\frac{\sigma_d}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{q}} \tag{3.8}$$

Selanjutnya, model material Johnson-Cook (JC) merupakan model yang merepresentasikan tegangan dari suatu material sebagai produk dari regangan, laju regangan, dan temperatur sebagaimana ditampilkan pada persamaan (3.9). Parameter A adalah nilai *yield strength* awal material pada temperatur ruang, B dan n adalah modulus pengerasan (*hardening modulus*) dan pangkat kerja pengerasan (*work-hardening exponent*), C dan m adalah laju regangan pengerasan (*strain rate hardening*) dan koefisien pelunakan panas (*thermal softening coefficient*), kemudian $\bar{\sigma}$, $\bar{\epsilon}$, $\dot{\epsilon}$, $\dot{\epsilon}_0$, T_r , dan T_m adalah tegangan, regangan plastis, laju regangan plastis efektif, laju regangan referensi, suhu ruang, dan suhu leleh. Model material ini memiliki keunggulan dalam hal kemudahan dalam proses kalibrasi dari parameter-parameter model yang digunakan.

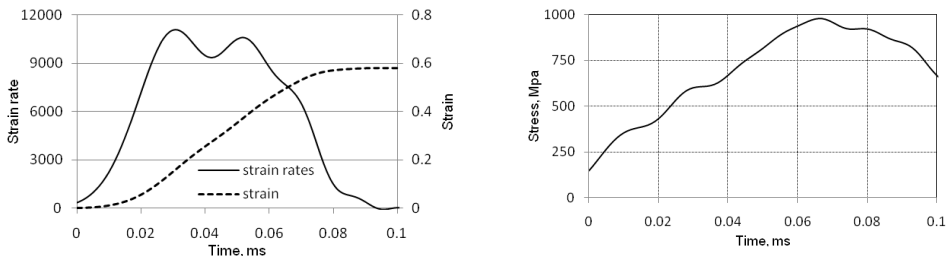
$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon})^n] \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right] \tag{3.9}$$



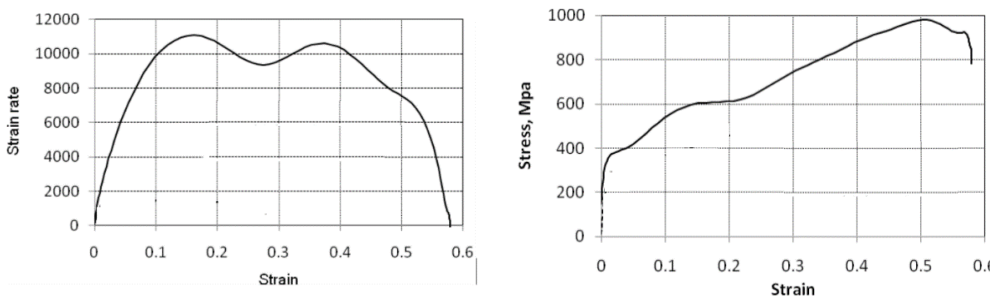
Gambar 41 Gelombang regangan datang (*incident*), pantulan (*reflected*) dan terusan (*transmitted*) hasil simulasi pengujian SHPB menggunakan MEH (Gunawan, et al., 2012)



Gambar 42 Gelombang regangan datang (*incident*), pantulan (*reflected*) dan terusan (*transmitted*) hasil simulasi pengujian SHPB menggunakan MEH yang telah dipilah per komponen (Gunawan, et al., 2012)



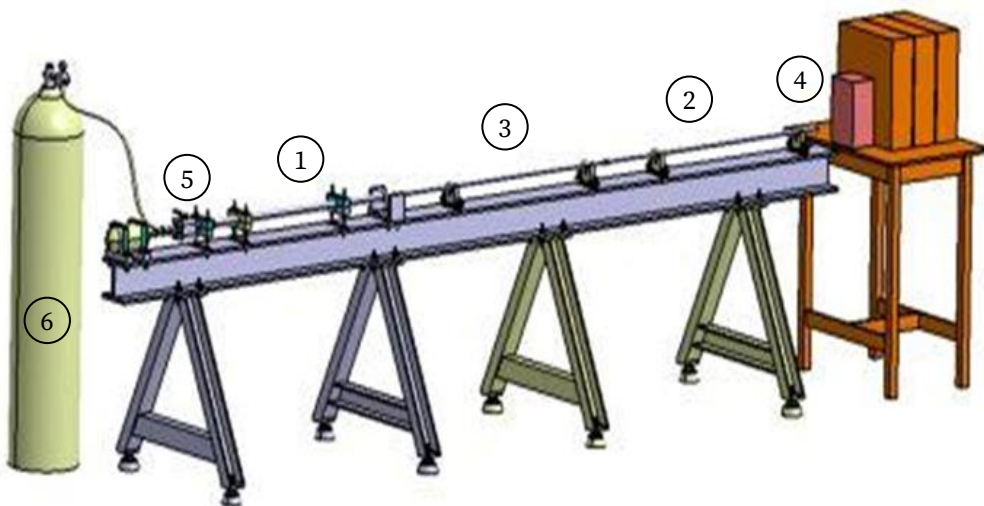
Gambar 43 (a) Strain rates, strain, dan (b) stress spesimen sebagai fungsi waktu (Gunawan, et al., 2012)



Gambar 44 (a) Laju regangan (*strain rates*) vs regangan (*strain*), dan (b) tegangan (*stress*) vs regangan (*strain*) (Gunawan, et al., 2012)

Gambar 45 menunjukkan tampak isometrik rancangan alat SHPB beserta komponen-komponennya. **Gambar 46** menunjukkan alat SHPB yang sudah dibuat dan menunjukkan ukuran dan material sistem batang. Batang terbuat dari material AISI 4340 dengan $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, $E = 205 \text{ GPa}$, $\sigma_y = 710 \text{ MPa}$, dan $\sigma_u = 2500 \text{ MPa}$. Material ini dipilih karena sistem batang ini dirancang untuk masih berada di daerah elastis saat alat SHPB dipakai untuk menguji spesimen yang terbuat dari material yang akan mengalami regangan plastis di daerah tegangan hingga 500 MPa .

Kegiatan pengembangan dimulai dengan perancangan awal dan beberapa simulasi numerik pengujian berdasarkan rancangan awal tersebut. Sebelum alat dibuat, dilakukan studi ke Computational Solid Mechanics and Design (CSMD) Laboratory, KAIST, guna mendapatkan pengalaman langsung pengukuran sifat material pada laju regangan *intermediate* dan tinggi (Gunawan, et al., 2013) (Afdhal, et al., 2014). Beberapa studi juga dilakukan untuk memverifikasi desain awal SHPB sebelum akhirnya desain tersebut disempurnakan alat tersebut dibuat dan divalidasi (Afdhal, 2015) (Afdhal, et al., 2016) (Afdhal, et al., 2016). Setelah alat dibuat, beberapa studi dilakukan untuk mengevaluasi kualitas alat tersebut. Salah satu yang utama dalam studi ini adalah evaluasi pengaruh ketidaklurusan batang *input* dan *output* terhadap hasil pengukuran yang sangat penting karena persamaan yang digunakan dalam perhitungan sifat material spesimen didasarkan dengan asumsi bahwa gelombang merambat secara aksial pada sistem batang. Hasil studi menunjukkan bahwa ketidaklurusan batang sebesar maksimum 0.36 mm per 100 mm panjang batang dapat diterima sebagai batas atas ketidaklurusan sistem batang yang masih dapat memberi hasil yang baik (Afdhal, et al., 2016) (Afdhal, et al., 2021).



No	Keterangan	No	Keterangan
1	Striker Bar	4	Stopper
2	Transmitter Bar	5	Sistem penembak
3	Spesimen	6	Bejana tekan dan regulator

Gambar 45 Rancangan *Split Hopkinson Pressure Bar* (Adrian, et al., 2011)



Gambar 46 Split Hopkinson Pressure Bar yang dikembangkan di Laboratorium Struktur Ringan FTMD (Afdhal, 2015)

Tabel 1 Spesifikasi sistem batang alat SHPB yang dikembangkan di Laboratorium Struktur Ringan FTMD

Nama Komponen	Material	Ukuran (mm)	
		Diameter	Panjang
Batang Striker	AISI 4340	20	200
Batang Input	AISI 4340	20	1500
Batang output	AISI 4340	20	1500

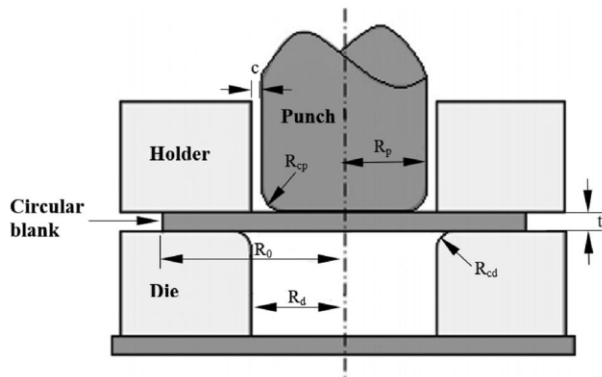
Dengan menggunakan SHPB ini, telah dilakukan pengembangan model konstitutif material pelat logam hasil proses *cold-rolling* produksi PT Krakatau Steel. Karakterisasi sifat material pelat logam dilakukan untuk mendapatkan informasi yang komprehensif terhadap perilaku material pada rentang laju regangan statik hingga dinamik dengan mempertimbangkan sifat anisotropik dan perilaku viskoplastis material. Data yang didapat digunakan untuk mengembangkan model konstitutif material pelat logam tersebut. Selanjutnya dilakukan eksperimen *cup-drawing* menggunakan dua jenis lembaran logam, satu tebal (1.5 mm) dan satu lainnya tipis (0.5 mm). Model MEH eksperimen ini dibuat dengan menggunakan model material yang telah kembangkan. **Gambar 47** menunjukkan skema pengujian *cup drawing* yang dilakukan. **Gambar 48** menunjukkan hasil eksperimen *cup-drawing* untuk kedua jenis lembaran logam. **Gambar 49** menunjukkan perbandingan hasil simulasi dengan hasil eksperimen untuk lembaran tipis dan **Gambar 50** untuk lembaran tebal. Dapat dilihat bahwa simulasi numerik yang dilakukan dapat memprediksi hasil eksperimen dengan baik (Afdhal, et al., 2022).

Beberapa studi lain menggunakan alat SHPB yang dikembangkan telah dilakukan, antara lain:

1. Pengujian sifat mekanik material logam ST37 dan aluminum 6063 pada laju regangan tinggi untuk mengetahui perilaku *viscoplastic* dua material

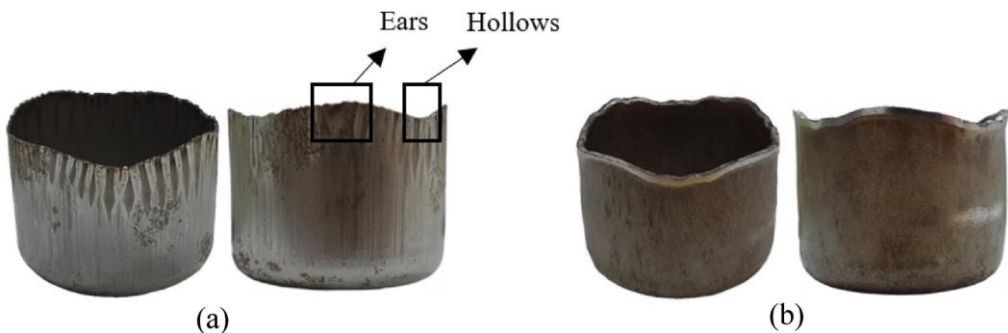
tersebut. Hasilnya dimanfaatkan dalam analisis struktur penyerap energi otomotif yang lebih akurat (Afdhal, et al., 2016).

2. Studi karakterisasi sifat dinamik komponen baterai 18650 NCA Li-ion berdasarkan sifat material komponen jellyrol yang diuji menggunakan teknik SHPB dan sifat material tumpukan lapisan foil tipis aluminium dan tembaga yang diuji menggunakan teknik SHTB (Split Hopkinson Tension Bar). Sistem SHTB didapat dengan memodifikasi konfigurasi sistem batang SHPB. Dalam pengujian SHPB dan SHTB tersebut, karena material yang diuji memiliki kekuatan yang tidak tinggi, sistem bar pada alat SHPB/SHTB diganti dengan material *polymethylmethacrylate* (PMMA). Dari data sifat material yang diperoleh, respons baterai terhadap beban impact dapat disimulasikan dengan baik (Fadillah, et al., 2020).

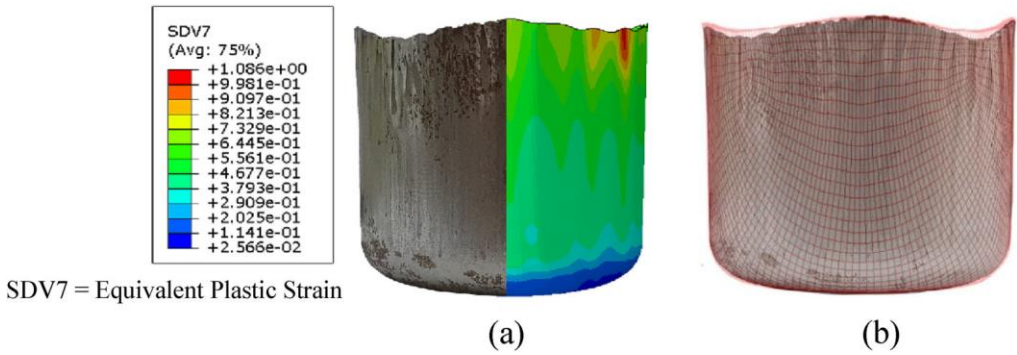


Specimen type	R_0 (mm)	R_d (mm)	R_p (mm)	R_{cp} (mm)	R_{cd} (mm)	t_0 (mm)	c (mm)
Thin	40	20.54	20	5	6.5	0.5	1.65
Thick	40	21.65	20	5	6.5	1.5	1.65

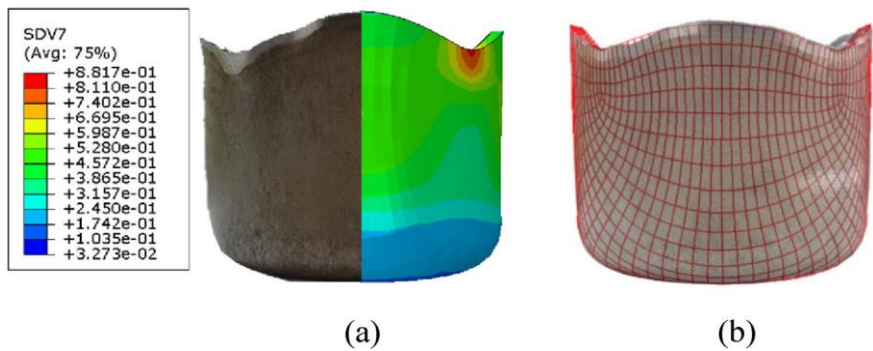
Gambar 47 Skema eksperimen *cup drawing*



Gambar 48 Hasil eksperimen *cup-drawing* untuk lembaran baja (a) tipis, dan (b) tebal



Gambar 49 Perbandingan tinggi kupingan (*earing height*) antara hasil numerik dan eksperimen untuk lembaran tipis dalam bentuk (a) *side to side* dan (b) *overlay*



Gambar 50 Perbandingan tinggi kupingan (*earing height*) antara hasil numerik dan eksperimen untuk lembaran tebal dalam bentuk (a) *side to side* dan (b) *overlay*

3. Pengujian sifat mekanik material logam hasil proses *cold-rolling* pada laju regangan tinggi. Pengujian perilaku viscoplastis material ini dilakukan pada tiga orientasi, yakni 0° , 45° , dan 90° . Hasil pengujian menunjukkan bahwa terdapat sifat anisotropi perilaku viscoplastis material logam pada ketiga orientasi tersebut (Perkasa, et al., 2023).
4. Pengujian sifat mekanik material busa aluminium (*aluminum foam*) untuk mendapatkan informasi yang komprehensif dan mengevaluasi perilaku viskoplastis material tersebut. Hasil pengujian menunjukkan bahwa material busa aluminium memiliki kecenderungan sifat viskoplastis. Data hasil pengujian kemudian digunakan sebagai model material dalam model MEH suatu komponen yang terbuat dari material busa aluminium. Simulasi numerik yang dilakukan dapat dengan baik memprediksi perilaku komponen tersebut pada laju regangan tinggi (Gunawan, et al., 2024).

3.3 Pengembangan Struktur Tambahan Kendaraan Angkut Personel untuk meningkatkan Ketahanan terhadap Beban Ledakan

Salah satu aplikasi praktis dari penguasaan kemampuan analisis struktur yang terkena beban impak adalah studi *blastworthiness* kendaraan tempur, yaitu struktur yang memiliki kemampuan untuk berubah bentuk secara terkendali dan mempertahankan ruang sisa yang cukup di sekitar penumpang untuk membatasi cedera tubuh selama terkena beban ledakan (Pratomo, et al., 2020). Tujuan utama penelitian ini adalah untuk merancang struktur tambahan pada suatu kendaraan tempur sehingga tahan terhadap beban ledakan setara 8 kg TNT. Dalam standar STANAG 4569, ketahanan kendaraan tempur dapat dikategorikan ke Level 3, seperti ditunjukkan pada **Tabel 2** (NATO, 2012).

Tabel 2 Level perlindungan penumpang kendaraan tempur dari ancaman ranjau (NATO, 2012)

Level	Ancaman granat dan ranjau	Berat TNT (kg)
4	4b Ledakan ranjau di bawah perut kendaraan	10
	4a Ledakan ranjau yang diaktifkan oleh ban di lintasan kendaraan	
3	3b Ledakan ranjau di bawah perut kendaraan	8
	3a Ledakan ranjau yang diaktifkan oleh ban di lintasan kendaraan	
2	2b Ledakan ranjau di bawah perut kendaraan	6
	2a Ledakan ranjau yang diaktifkan oleh ban di lintasan kendaraan	
1	Granat tangan, fragmen sub amunisi artileri yang tidak meledak, dan ranjau anti personel kecil lainnya yang meledak di mana saja di bawah kendaraan	

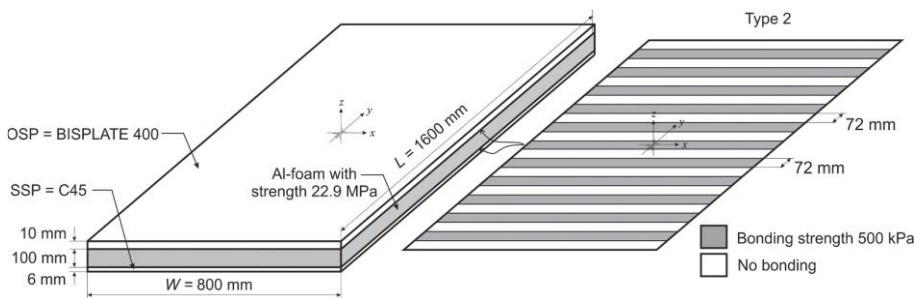
Kajian mengenai respons struktur terhadap beban ledak diawali dengan kajian numerik panel metal terhadap beban ledak menggunakan MEH. Respons lima jenis panel dipelajari, yaitu panel tanpa *stiffener*, panel berpenguat silang tunggal (*single cross stiffener*), panel berpenguat silang ganda (*double cross stiffener*), panel cekung (*concave*), panel cembung (*convex*). Ukuran tiap panel adalah 406 mm × 406 mm terbuat dari material baja St37. Respons panel terhadap beban ledakan dipelajari memvariasikan kekuatan dan jarak peledak. Kesimpulan studi awal ini adalah tambahan *stiffener* atau tambahan kelengkungan pada panel efektif membuat deformasi pelat menjadi lebih kecil sekitar 64% daripada deformasi pelat datar (Furqan, et al., 2016)..

Beberapa perkembangan di dunia militer menunjukkan bahwa penumpang kendaraan tetap mengalami cedera saat kendaraan terkena ledakan, walaupun kendaraan tidak rusak parah. Dengan demikian perlindungan penumpang tidak hanya dengan penggunaan struktur yang kuat menahan beban ledak, tetapi juga mampu menyerap energi ledakan. Studi selanjutnya dilakukan terhadap struktur sandwich metal yang terdiri atas 3 bagian: kulit depan dan kulit dalam dengan foam aluminium di antaranya. Foam berfungsi menambah kekakuan struktur dan juga membantu penyerapan energi ledakan. Konfigurasi ini akan memperingan beban kendaraan sehingga lebih lincah dan efisien. Untuk mengetahui konfigurasi struktur yang dapat menahan beban ledakan dan menyerap energi ledakan, dilakukan kajian numerik menggunakan 21 panel berukuran $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ dengan konfigurasi berbeda-beda, yaitu panel *single plate* (3 buah), panel *metal sandwich* (8 buah), dan panel *foam sandwich* (8 buah). Konfigurasi struktur sandwich dirancang menggunakan 2 lapisan, yaitu material padat pada sisi yang langsung terkena ledakan dan lapisan kedua menggunakan material solid atau busa metal. Lapisan pertama berfungsi menahan ledakan, menyerap energi, dan mendistribusikan beban ke bagian dalam dengan merata, sedangkan lapisan kedua membantu penyerapan energi. Hasil paling penting dari studi ini adalah panel dengan *foam sandwich* memiliki kemampuan penyerapan energi per satuan massa yang paling baik (Santosa, et al., 2016).

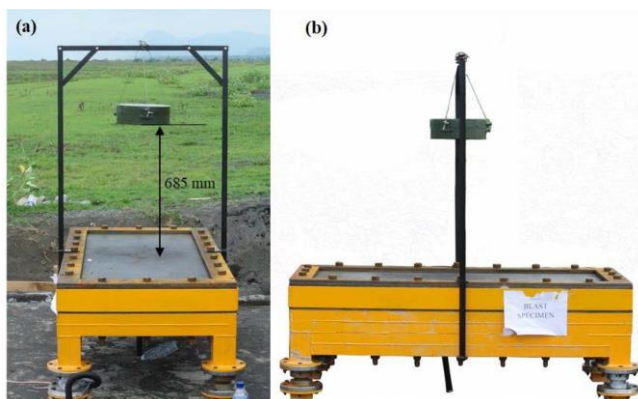
Setelah diketahui bahwa struktur *foam sandwich* merupakan struktur yang potensial dalam penyerapan energi, terutama karena kemampuan penyerapan energi per satuan berat yang baik dibandingkan dengan *metal sandwich*, dilakukan studi penyerapan energi oleh panel *foam metal sandwich* akibat beban ledakan secara eksperimen dan numerik. Model numerik menggunakan Metode Elemen Hingga (MEH) dikembangkan untuk ledakan, fragmentasi, dan sandwich busa aluminium untuk memprediksi respons dinamik dan kegagalan karena ledakan 8 kg TNT sesuai dengan standar yang diacu (NATO, 2012).

Panel *sandwich* yang dipelajari adalah *Aluminum Foam Sandwich* (AFS) berbentuk panel dengan ukuran $1600\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ dan ketebalan 116 mm. Dalam arah ketebalan, panel terdiri atas satu lembar pelat baja dengan ketebalan 6 mm pada sisi luar (yang menahan beban ledakan), satu lembar aluminium foam dengan ketebalan 100 mm, dan satu lembar pelat baja dengan

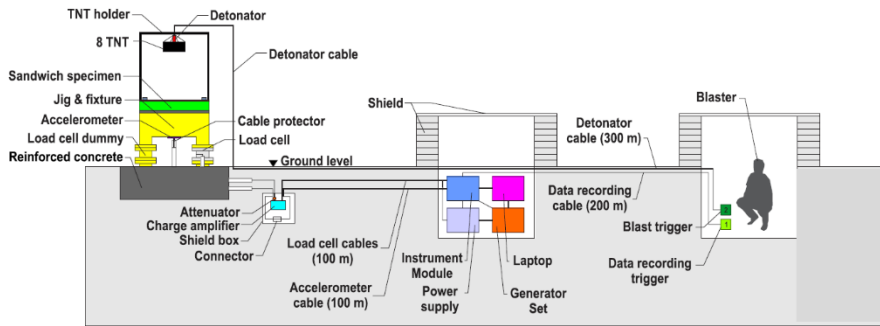
ketebalan 10 mm pada sisi dalam, seperti ditunjukkan pada **Gambar 51**. Baja sisi luar adalah C45 dengan kekuatan *yield* 517 MPa dan kekuatan *ultimate* 650 MPa. Material sisi luar yang menahan ledakan biasanya dipilih yang memiliki kekuatan sedang dan perpanjangan tinggi untuk mengubah energi ledakan besar menjadi energi deformasi (area di bawah kurva tegangan-regangan). Baja sisi dalam adalah BISPLATE 400 dengan kekuatan yield sebesar 1200 MPa dan kekuatan ultimate 1500 MPa. Material ini dipilih karena kekuatan yang sangat tinggi dan memiliki blast resistance yang baik (Ma & Liew, 2013). Busa aluminium yang dipakai memiliki densitas relatif (terhadap material dasar) sekitar 30% dan tegangan plateau sebesar 22.9 MPa. Sifat material busa ini dipilih mengikuti Fleck-Deshpande (2004), yang menyatakan bahwa penyerapan energi oleh *core* struktur *sandwich* yang ideal jika rasio kekuatan tarik dalam arah normal terhadap kekuatan tarik dalam arah longitudinal sebesar 0.3, di mana harga rasio tersebut dapat diestimasi dari nilai densitas relatif *foam*.



Gambar 51 Spesimen *sandwich* busa aluminium yang digunakan dalam uji ledak (Pratomo, et al., 2020)



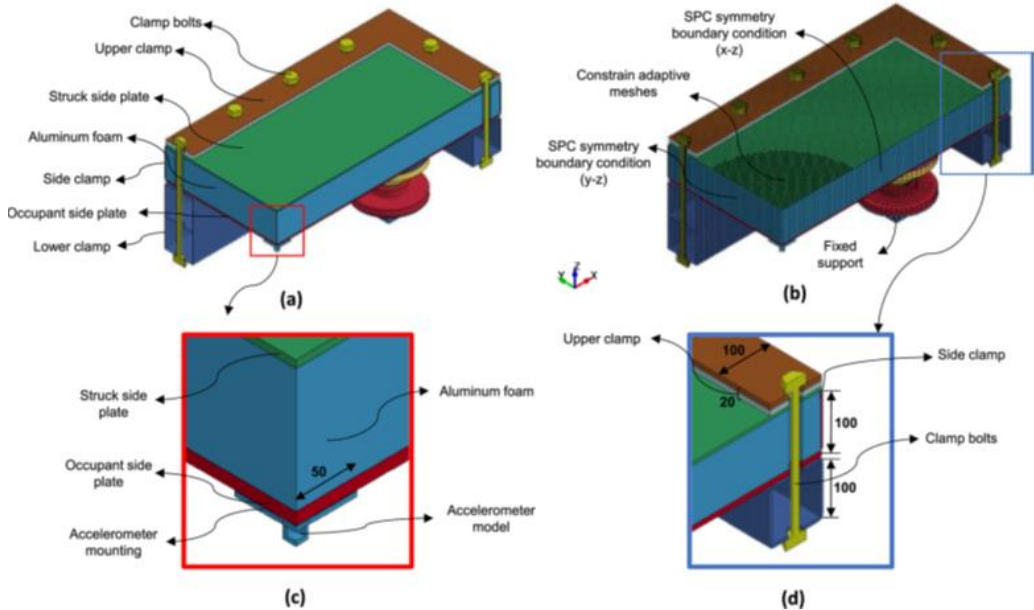
Gambar 52 *Set-up* uji ledakan menggunakan 8 kg TNT: (a) tampak depan, dan (b) tampak samping (Pratomo, et al., 2020)



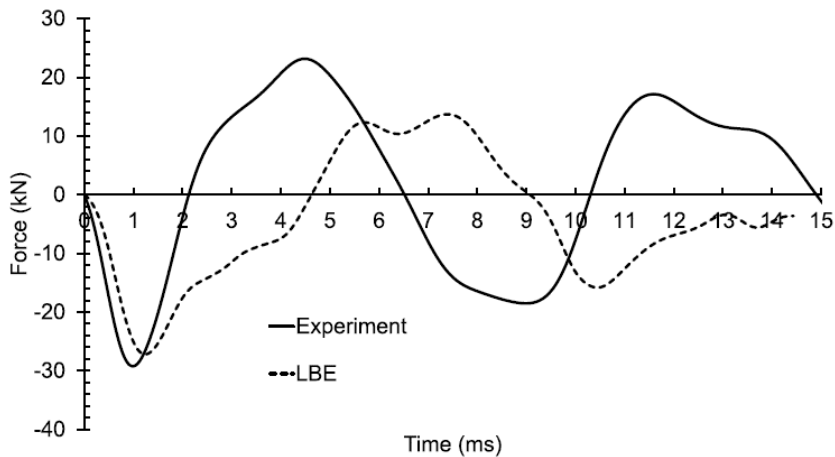
Gambar 53 Skema lengkap validasi eksperimental *aluminum foam sandwich* yang diberi beban ledakan 8 kg TNT dengan penutup baja (Pratomo, et al., 2020)

Untuk mendapatkan model MEH AFS dan beban ledakan yang baik, dilakukan pengujian untuk mengkoleksi data-data yang berguna dalam pengembangan model MEH. Pengujian dilakukan di Lapangan Tembak, Air Weapon Range (AWR) TNI AU, Pandangwangi, Lumajang, Jawa Timur. **Gambar 52** menunjukkan spesimen uji di tempat uji ledak dan **Gambar 53** menunjukkan skema lengkap *set-up* pengujian (Pratomo, et al., 2020). Sumber ledakan berupa 8 kg TNT dengan penutup baja setebal 1.5 mm sebagai representasi ranjau darat modern dan diposisikan pada sejauh 685 mm di atas AFS. Spesimen dipasang di atas beton bertulang dengan ketebalan sekitar 50 mm, menggunakan *jig* dan *fixture* yang terdiri atas klem bawah dengan ketebalan 6 mm, dan klem atas dengan ketebalan 10 mm. Pada kaki *jig* dipasang *loadcell* untuk mengukur beban ledakan yang terjadi dan di bawah panel AFS, pada posisi tengah, dipasang akselerometer untuk mengukur percepatan yang terjadi.

Secara paralel, dikembangkan juga model MEH pengujian ini, seperti ditunjukkan pada **Gambar 54**. Dua jenis model beban ledakan diterapkan, yaitu *Load-blast-enhanced* (LBE) dan *Smooth Particle Hydrodynamic* (SPH). Peledak dimodelkan tanpa dan dengan pembungkus untuk mengetahui pengaruh pembungkus bahan peledak terhadap panel AFS. Hasil eksperimen ledakan digunakan untuk memvalidasi dan menyempurnakan model numerik yang dikembangkan. Pengujian dilakukan dalam dua tahap, yaitu menggunakan peledak kecil berukuran 60 gram untuk uji fungsional instrumentasi dan menggunakan peledak utama 8 kg.



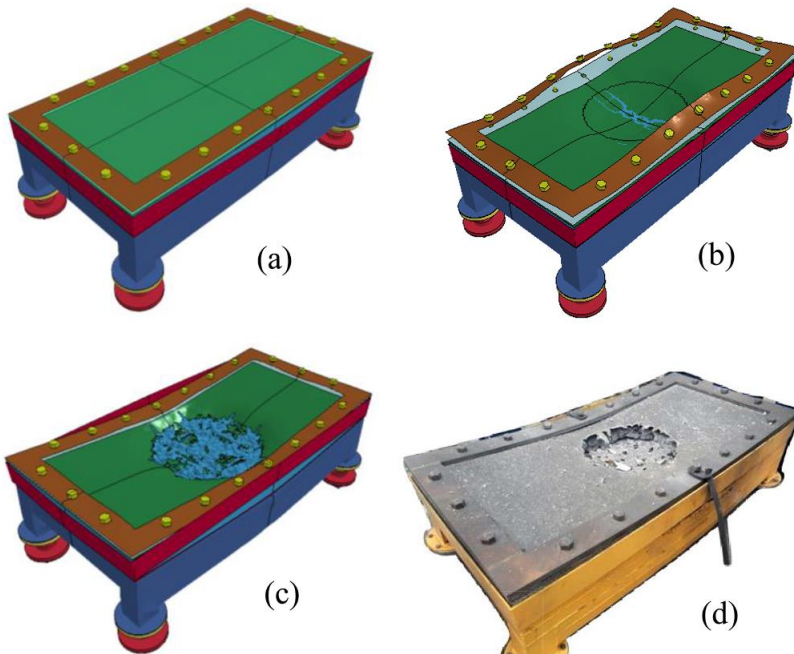
Gambar 54 Model numerik uji ledakan: (a) model quarter symmetry, (b) kondisi batas, (c) posisi akselerometer, dan (d) sistem klem (ukuran dalam mm) (Pratomo, et al., 2020)



Gambar 55 Perbandingan gaya reaksi yang diukur dan berdasarkan simulasi MEH untuk kasus ledakan dengan 60 gram TNT (Pratomo, et al., 2020)

Gambar 55 menunjukkan data gaya reaksi pada penumpu spesimen yang didapat dari uji fungsional dan hasil simulasi MEH berdasarkan data uji ledak dengan TNT 60 gram setelah dilakukan penyesuaian pada model MEH, yang menunjukkan bahwa prediksi beban yang dialami oleh spesimen cukup baik. **Gambar 56** menunjukkan efek ledakan pada struktur AFS setelah terkena

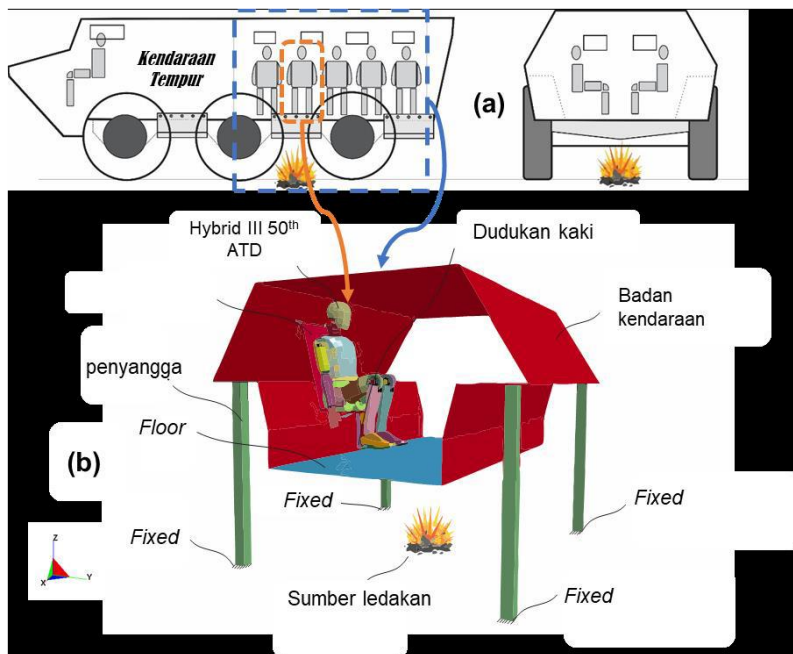
ledakan 8 kg TNT menggunakan (a) simulasi MEH dengan model beban ledakan LBE, (b) simulasi MEH dengan model beban ledakan SPH tanpa adanya pembungkus peledak, (c) simulasi MEH dengan model beban ledakan SPH dengan pembungkus peledak, dan (d) hasil pengujian. Dapat dilihat bahwa model MEH yang dikembangkan menggunakan model beban ledakan SPH di mana bahan peledak dimodelkan secara lengkap dengan pembungkus baja dapat mensimulasikan hasil pengujian dengan baik. Data pengujian berupa gaya ledakan yang dialami oleh spesimen tidak dapat terekam dengan baik karena load yang dialami melebihi perkiraan awal.



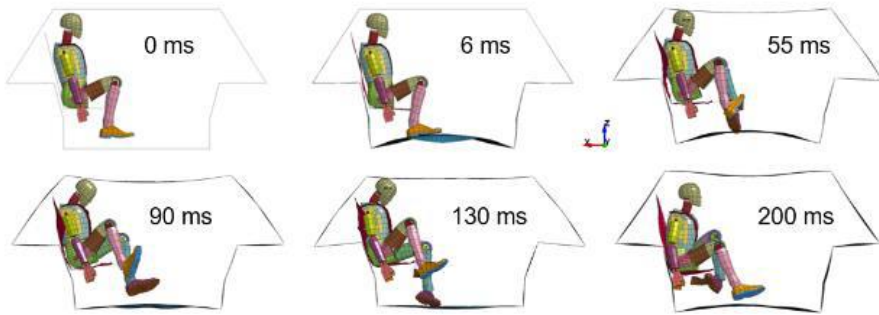
Gambar 56 Perbandingan kerusakan spesimen: (a) Model spesimen, (b) kerusakan akibat peledak yang dimodelkan menggunakan SPH tanpa wadah (casing), (c) (b) kerusakan akibat peledak yang dimodelkan menggunakan SPH dan wadah,,(d) hasil pengujian (Pratomo, et al., 2020)

Berdasarkan model MEH yang telah dikembangkan, dilakukan optimasi desain AFS yang dipasang pada tiga posisi di bawah lantai kendaraan angkut penumpang menggunakan metode *design for six sigma* (DFSS). Hasil optimasi menunjukkan bahwa parameter yang penting dalam desain optimum adalah pola *bonding*, kekuatan dan ketebalan material pelat pada sisi dalam dan sisi luar, serta ketebalan dan kekuatan AFS (Pratomo, et al., 2021). Setelah didapat desain AFS yang optimum, dilakukan simulasi peledakan pada kendaraan angkut personel guna mengetahui deformasi yang dialami oleh kendaraan

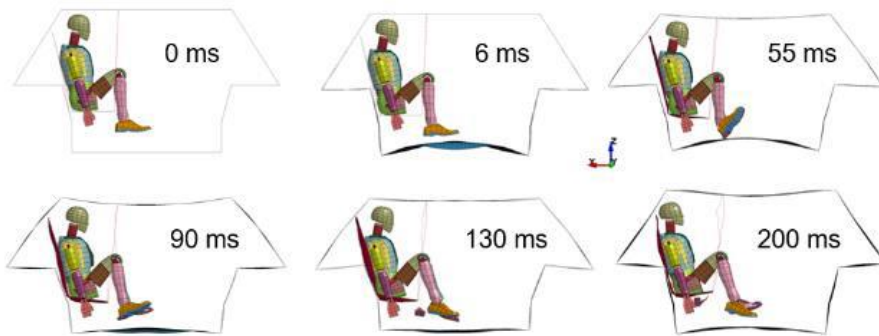
dan percepatan yang dialami oleh personel saat terkena ledakan. **Gambar 57** menunjukkan lokasi pemasangan AFS di bawah lantai kendaraan dan model MEH yang dikembangkan. Model MEH ini, selain digunakan untuk memprediksi deformasi yang dialami oleh kendaraan, juga untuk memprediksi kinematika dan cedera yang terjadi pada penumpang. Untuk itu dalam penumpang dalam MEH dimodelkan menggunakan model Hybrid III 50th ATD. Dalam studi, telah dilakukan modifikasi terhadap kursi kendaraan sehingga didapat konfigurasi kursi yang lebih baik dan dapat melindungi penumpang dari cedera yang serius. **Gambar 58** dan **Gambar 59** menunjukkan gerakan penumpang saat kendaraan terkena beban ledakan 8 kg TNT sebelum dan setelah dilakukan modifikasi kursi penumpang. Modifikasi kursi yang dilakukan telah dapat mengurangi cedera penumpang, terutama cedera kepala, cedera leher dalam arah aksial, serta cedera tulang kering atas dan bawah (Pratomo, 2020). Konsep AFS sebagai pelindung kendaraan tempur dan kursi penumpang yang dimodifikasi telah diuji oleh PINDAD dengan hasil yang baik. Hasil lain yang didapat dari penelitian ini adalah Pedoman dan Prosedur Operasional Standar Perancangan Struktur Tahan Ledak (Laboratorium Struktur Ringan - FTMD ITB, 2021).



Gambar 57 Penerapan AFS sebagai pelindung kendaraan pengangkut personel lapis baja terhadap ledakan dari bawah dan model MEH kendaraan dan penumpang di dalamnya (Pratomo, et al., 2021)



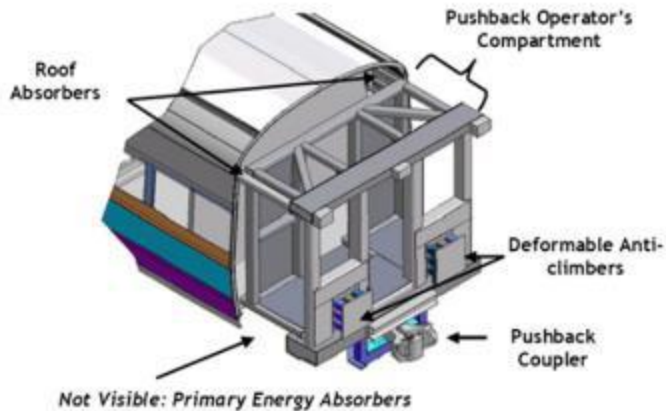
Gambar 58 Kinematika penumpang kendaraan pengangkut personel selama ledakan 8 kg TNT sebelum dilakukan modifikasi kursi (Pratomo, 2020)



Gambar 59 Kinematika penumpang kendaraan pengangkut personel selama ledakan 8 kg TNT setelah dilakukan modifikasi kursi (Pratomo, 2020)

3.4 Studi Kelaiktabrakan Kereta Cepat Merah Putih

Saat ini FTMD ITB terlibat dalam studi pengembangan Kereta Cepat Merah Putih (KCMP) bersama tim dari beberapa universitas lain dan PT INKA. Salah satu aspek yang dianalisis adalah kelaiktabrakan kereta, sebagai aplikasi praktis bidang mekanika impak yang telah dipelajari dan dikembangkan beberapa tahun. Studi kelaiktabrakan kereta api dapat diringkas menjadi dua aspek, yaitu studi tentang *Crash Energy Management (CEM)* berbagai skenario tabrakan kereta api, dengan mempertimbangkan tingkat kerusakan dan keutuhan ruang/zona aman saat tabrakan serta desain perangkat penyerapan energi dan meningkatkan kelaikantabrakan yang berbeda (Zhang, et al., 2020). Komponen utama dalam sistem ini adalah *pushback coupler*, *anti climber*, dan *crash buffer (energy absorber)*, seperti ditunjukkan pada **Gambar 60**.



Gambar 60 Konfigurasi tipikal *pushback coupler*, *energy absorber*, dan *anti-climber* (Gao & Wang, 2019)

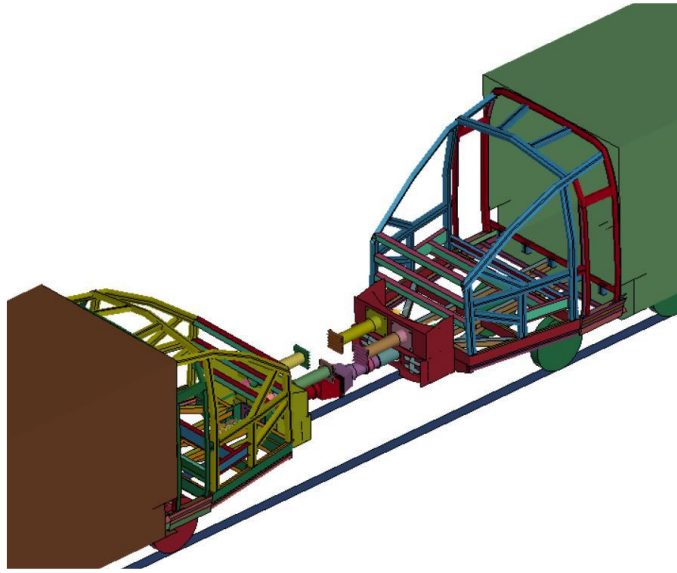
Beberapa analisis kelaiktabrakan KCMP telah dilakukan secara numerik menggunakan MEH yang meliputi:

- c. Analisis CEM yang terdiri atas coupler, crash buffer dan anti-climber (Haq, 2023)
- d. Analisis sambungan intercar (Nugraha, 2023)
- e. Evaluasi material dan ketebalan maskara saat terjadi tabrakan (Nuralamsyah, 2023).

Studi pertama dilakukan untuk mengevaluasi penyerapan energi tabrakan oleh bagian depan kereta. **Gambar 61** menunjukkan model kereta dengan detail yang dipusatkan di daerah depan, sedangkan daerah belakang tidak detail. **Gambar 62** menunjukkan pandangan isometrik model di daerah depan kereta. Dalam simulasi tabrakan, kedua model kereta tidak diberi *constrain* apapun, yakni bisa bergerak dalam arah manapun sehingga kereta hanya ditumpu oleh rel dengan kontrain kontak. Dalam kasus ini, salah satu kereta diberi kecepatan 10 m/s menabrak kereta yang diam di atas rel (kecepatan 0 m/s) mengikuti regulasi SNI 8826 untuk evaluasi kelaiktabrakan khusus kereta cepat (B. S. Nasional, 2019).



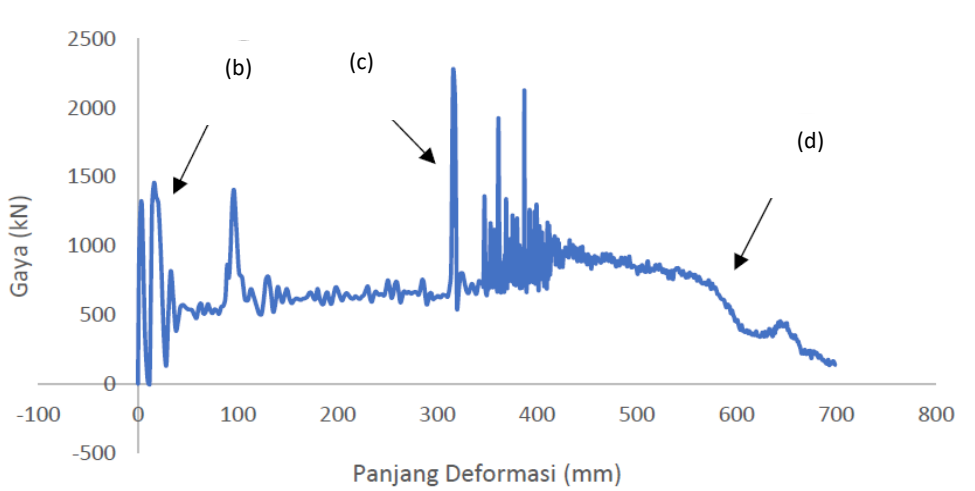
Gambar 61 Model kereta dengan detail di bagian depan yang digunakan dalam simulasi tabrakan (Haq, 2023)



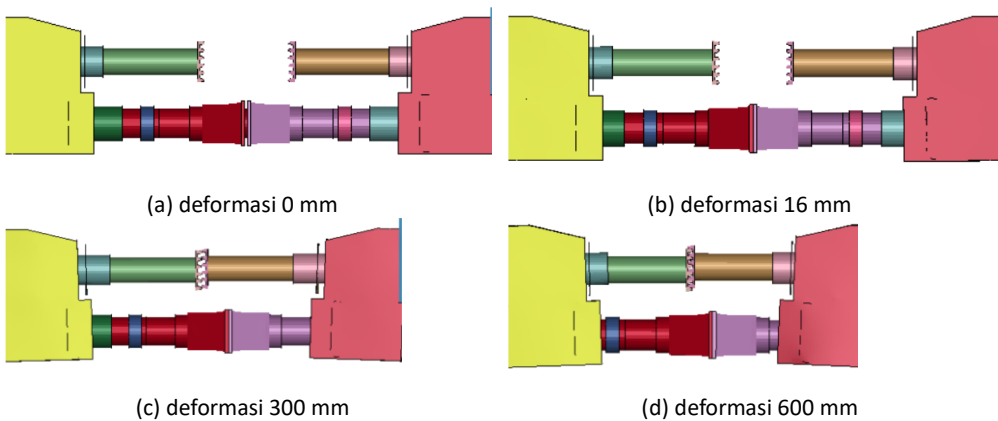
Gambar 62 Pandangan *isometric* model detail bagian depan kereta (Haq, 2023)

Gambar 63 menunjukkan gaya reaksi kereta saat mengalami tabrakan sebagai fungsi dari deformasi kereta. Beberapa gaya puncak yang muncul pada deformasi 0 mm, 16 mm, 300 mm dapat dijelaskan dengan urutan kontak antara berbagai komponen CEM seperti ditunjukkan pada **Gambar 64**. Pada deformasi 0 mm mulai terjadi kontak antara *coupler* yang selanjutnya mulai menyerap energi. Pada deformasi 16 mm, *shear-off bolt* pada *coupler* mengalami kegagalan karena beban yang terjadi sudah melebihi batas maksimum beban yang dapat diterima oleh *buffer coupler*. Pada deformasi 300 mm *anticlimber* mulai saling mencengkram dan selanjutnya *crash buffer* mulai menyerap energi. Pada deformasi 600 mm energi kinetik tabrakan sudah mulai terserap habis dan gaya kontak mulai menurun.

Beberapa data hasil simulasi digunakan untuk mengevaluasi kinerja KCMP saat terjadi tabrakan berdasarkan standar EN 15277 (European Committee for Standardization, 2020). **Tabel 3** menunjukkan data perlambatan kereta, perpindahan vertikal, dan ruang sisa aman yang diperoleh dari simulasi tabrakan. Dapat dilihat bahwa parameter gaya vertikal dan perlambatan kereta memenuhi standar EN15227 dan perpindahan vertikal roda, yang terkait dengan fenomena *over riding* tidak memenuhi standar.



Gambar 63 Gaya reaksi kereta pada berbagai panjang deformasi (Haq, 2023)



Gambar 64 Mode deformasi CEM hasil simulasi tabrakan model kereta (Haq, 2023)

Beberapa studi parametrik juga dilakukan dengan mengubah-ubah posisi *anticlimber* dan *crash buffer* terhadap posisi coupler sejauh 430 mm, 330 mm, dan 230 mm. Hasil-hasil yang didapat menunjukkan bahwa perubahan posisi memengaruhi kemampuan anti *climber* dan *crash buffer* terhadap besarnya gaya vertikal yang terjadi. Studi parametrik juga dilakukan dengan mengubah-ubah serta jumlah gigi atau jarak gigi pada *anticlimber* sebesar 48 mm, 56 mm, dan 72 mm. Hasil-hasil menunjukkan bahwa pengubahan jarak gigi tidak banyak mengubah kemampuan anti *climber* untuk mencengkeram satu sama lainnya saat terjadi tabrakan.

Tabel 3 Gaya vertikal, percepatan, dan perpindahan roda hasil simulasi tabrakan menggunakan kereta dengan bagian depan yang dimodelkan secara detail

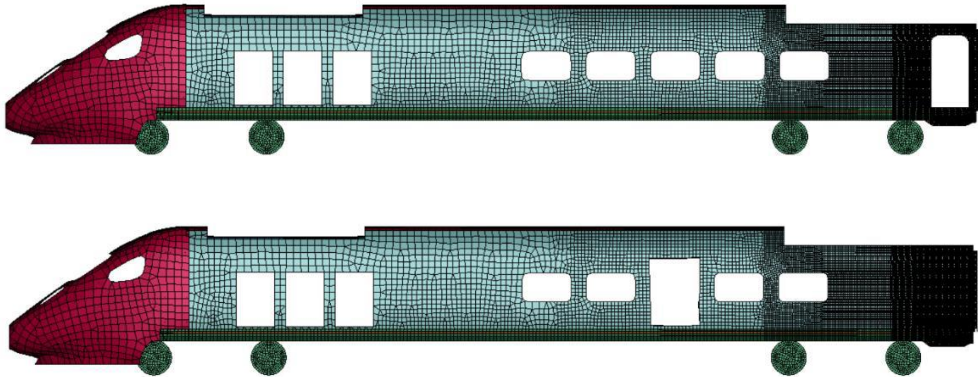
No	Kasus	Persyaratan EN 15227	Hasil simulasi	Keterangan
1	Perlambatan	5G	3.9 G	Memenuhi syarat
2	Overriding	Perpindahan vertikal roda ≤ 100 mm	Roda belakang terangkat hingga 250 mm	Tidak memenuhi syarat
		Salah satu roda masih menempel rel saat roda lainnya terangkat 40 mm	Roda depan terangkat terangkat sekitar 40 mm saat roda belakang terangkat sejauh 40 mm	
3	Ruang aman sisa (survival space)	>80% dimensi awal	>90% dimensi awal	Memenuhi syarat

Mekanisme penyerapan energi tabrakan untuk kereta penumpang harus dirancang dengan baik agar memenuhi persyaratan kelaikan tabrakan yang mayoritas didasarkan pada tabrakan *front-end*. Sebagian besar energi tabrakan diserap bagian depan kereta (*high energy crush zone*). Penyerapan energi yang tersisa selanjutnya antara lokomotif dan gerbong penumpang diserap oleh komponen penyerapan energi di bagian tersebut (*low-energy crush zone*). *High-energy* maupun *low-energy crush zone* dapat berupa satu atau kombinasi dari elemen yang dapat dihancurkan berurutan seperti *push-back coupler*, *anti-climber*, dan *buffer* yang merupakan komponen utama dari penyerapan energi (Sun, et al., 2012). Untuk itu studi berikutnya dilakukan untuk mempelajari penyerapan energi di daerah depan dan antar kereta saat terjadi tabrakan. Skenario tabrakan yang digunakan sama seperti pada studi sebelumnya, yaitu menggunakan 2 model kereta yang identik, satu kereta dalam kondisi diam dan satu lagi dengan kecepatan 10 m/s seperti ditunjukkan pada **Gambar 65**. Model MEH yang dikembangkan dalam studi ini lebih lengkap dibandingkan dengan studi sebelumnya karena semua komponen kereta harus dianalisis.



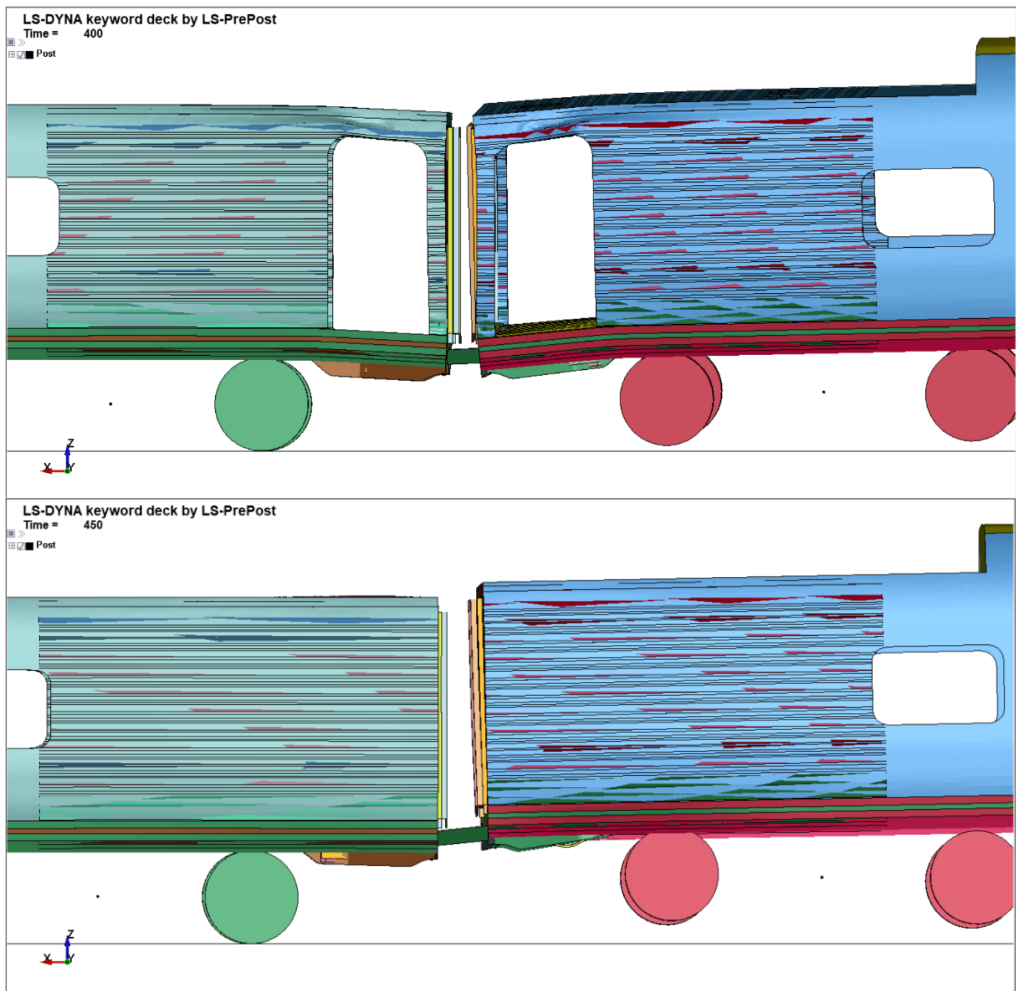
Gambar 65 Skenario tabrakan kereta menggunakan model lengkap (Nugraha, 2023)

Dua model kereta digunakan dalam studi ini, yaitu desain asli dengan pintu berada di daerah antarkereta sedangkan yang kedua adalah desain modifikasi di mana pintu dipindah dari daerah antarkereta ke tengah badan kereta, seperti ditunjukkan pada **Gambar 66**.



Gambar 66 Model geometri kereta cepat: desain asli (atas) dan desain alternatif (bawah) (Nugraha, 2023)

Gambar 67 menunjukkan kondisi di sekitar sambungan antarkereta berdasarkan simulasi tabrakan pada $t=450$ ms untuk kedua desain yang menunjukkan bahwa desain asli memiliki deformasi yang lebih besar di daerah antarkereta. Dalam kondisi ini terlihat bahwa kedua roda kereta terangkat. Penyerapan energi kinetik total kedua desain kereta saat tabrakan sebesar 2.36 MJ, dan distribusi penyerapan energi oleh berbagai komponen utama ditampilkan pada **Tabel 4**. Dapat dilihat bahwa perbedaan penyerapan energi ada pada lantai dan dinding, di mana desain modifikasi menyerap lebih energi rendah sebesar 3%. Sebagai kompensasinya, 3% energi kinetik tersebut diserap oleh komponen lainnya. Data-data lain berupa parameter kelaiktabrakan sesuai EN 15227 dapat dilihat pada **Tabel 5**. Dapat dilihat bahwa dengan menggunakan model lengkap seperti ini, masih banyak persyaratan yang belum dipenuhi. Dengan demikian studi lanjutan, terutama jika dapat dilakukan pengujian komponen ataupun pengujian lengkap, akan sangat membantu kepercayaan terhadap model yang dikembangkan.



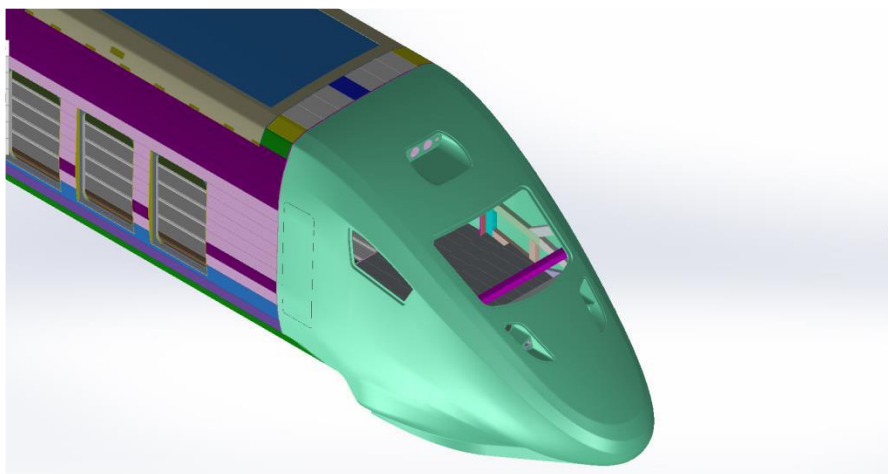
Gambar 67 Posisi dan deformasi desain asli (atas) dan desain alternatif (bawah) pada saat $t = 450$ ms (Nugraha, 2023)

Tabel 4 Uraian penyerapan energi kinetik tabrakan sebesar 2.36 MJ oleh berbagai komponen kereta

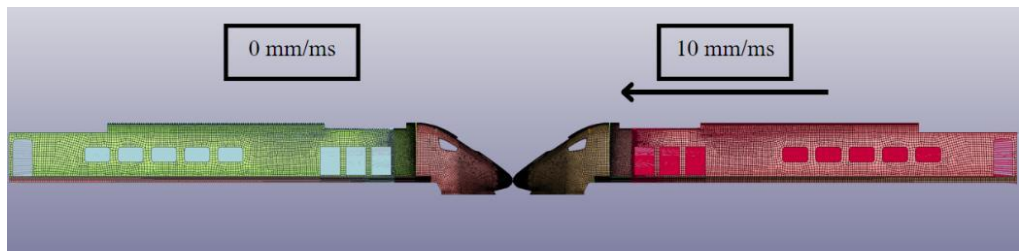
No.	Komponen	Penyerapan energi	
		Desain asli	Desain modifikasi
1	Coupler depan	19%	19%
2	Lantai dan atap	8%	5%
3	Dinding dan rangka samping	6%	6%
3	Coupler antar kereta	2%	2%
4	Struktur lain	65%	68%

Tabel 5 Gaya vertikal, percepatan, perpindahan roda, dan *passenger survival zone* hasil simulasi tabrakan menggunakan seluruh kereta yang dimodelkan secara detail

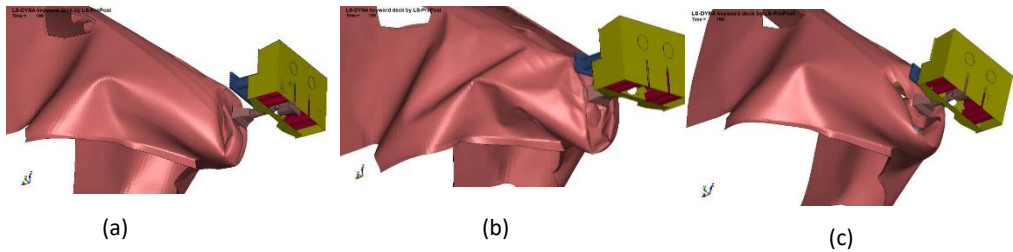
No	Kasus	Peryaratan EN 15227	Hasil simulasi		Keterangan
			Desain awal	Desan alternatif	
2	Perlambatan	5G	6.1 G	6.4 G	Kedua desain belum memenuhi syarat
3	Overriding	Perpindahan vertikal roda ≤ 100 mm. Salah satu roda masih menempel rel saat roda lainnya terangkat 40 mm	96 mm Saat salah satu roda terangkat 40 mm, roda lainnya juga terangkat.	125 mm Saat salah satu roda terangkat 40 mm, roda lainnya juga terangkat.	Kedua desain belum memenuhi syarat
4	Ruang aman sisa (survival space)	Pengurangan panjang survival zone maksimal 300 mm	26 mm	4 mm	Kedua desain memenuhi syarat



Gambar 68 Bagian maskara KCMP (warna hijau) (Dirgantara, et al., 2022)



Gambar 69 Skenario tabrakan kereta menggunakan model dengan maskara (Nuralamsyah, 2023)



Gambar 70 Bentuk Deformasi Maskara Untuk Berbagai *Running Case* (a) Aluminium 10 mm (b) Aluminium 3 mm (c) Komposit (Nuralamsyah, 2023)

Studi ketiga dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan beberapa jenis material maskara saat terjadi tabrakan, yaitu aluminium 10 mm, aluminium 3 mm, komposit 14 ply dan kasus kecelakaan yang digunakan adalah tabrakan *head-on* seperti yang digunakan studi pertama dan kedua. **Gambar 68** menunjukkan bagian maskara KCMP (Dirgantara, et al., 2022), dan **Gambar 69** menunjukkan model simulasi tabrakan menggunakan 2 model kereta yang identik, di mana setiap model dibuat detail di bagian depan termasuk maskara dan kurang detail di bagian belakang. Hasil-hasil simulasi tabrakan ditunjukkan pada **Gambar 70**, yang menunjukkan bahwa maskara dengan pelat aluminium 10 mm terlihat hanya sedikit mengalami deformasi, aluminium 3 mm mengalami deformasi yang lebih banyak, sedangkan maskara yang terbuat dari komposit 14 ply mengalami deformasi yang mirip dengan aluminium 10 mm. Energi yang diserap oleh maskara aluminium dengan ketebalan 10 mm adalah 325 kJ dan untuk maskara 3 mm adalah 76 kJ, sedangkan maskara komposit 112 kN. Terlihat bahwa aluminium mampu menyerap energi lebih banyak dibandingkan dengan maskara komposit. Karena maskara sebetulnya bukan komponen CEM, maka analisis ketebalan maskara yang diperlukan akan diteruskan berdasarkan ketahanannya terhadap impact proyektil mengikuti UIC E651 (UIC, 2002), menggunakan proyektil dengan massa 1 kg dan kecepatan 380 km/jam. Hasil tes harus memenuhi persyaratan antara lain proyektil tidak menembus spesimen kaca dan kaca masih tetap berada pada rangka pemegangnya.

Studi pertama dan kedua menunjukkan hasil yang berbeda karena penggunaan model yang berbeda. Untuk itu masih perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk mengembangkan model yang lebih baik dan mendapatkan prediksi yang konsisten dalam dua studi tersebut. Studi ketiga mengarahkan bahwa evaluasi maskara dilakukan bukan berdasarkan penyerapan energi

saat terjadi tabrakan total, karena hal itu dilakukan oleh sistem CEM. Saat ini evaluasi maskara dilakukan berdasarkan kriteria ketahanannya saat terkena benda asing berupa proyektil atau burung. Diharapkan studi-studi ini akan menghasilkan suatu model yang baik dan dapat digunakan membantu PT INKA merancang kereta cepat dengan baik di masa mendatang.

4 PENUTUP

Dalam buku ini telah disampaikan kegiatan penelitian beserta hasil-hasil yang telah dicapai terkait dinamika benda fleksibel dalam rentang daerah elastis dan daerah plastis. Di bagian pertama, dibahas analisis dinamika benda fleksibel di daerah elastis untuk masalah getaran, baik getaran mekanik di mana gaya-gaya yang bekerja hanya merupakan fungsi waktu, dan interaksi fluida-struktur di mana gaya-gaya yang bekerja pada struktur tidak hanya merupakan fungsi waktu namun juga fungsi dari gerakan struktur. Secara lebih spesifik, dibahas masalah aeroelastisitas yang merupakan salah satu contoh kasus *fluid structure interaction* di dunia dirgantara yang biasa dikenal sebagai masalah aeroelastisitas yang penting dalam perancangan pesawat udara. Dalam pembahasan getaran, diberikan contoh-contoh berupa getaran pada gedung tinggi, truk, dan satelit. Dalam kasus interaksi fluida-struktur diberikan contoh bagaimana aliran fluida mengeksitasi gerakan struktur yang dilalui. Dalam kasus aeroelastisitas, diberikan contoh bagaimana kestabilan aeroelastis pesawat terbang ditentukan. Penguasaan masalah ini mendukung perkembangan industri dirgantara dan industri lain di Indonesia. Di akhir bagian pertama disampaikan penelitian awal mengenai pemanfaatan material piezoelectric sebagai sensor/aktuator/pembangkit energi untuk material maju yang bisa dimanfaatkan oleh industri untuk berbagai produk maju yang mereka kembangkan.

Di bagian kedua, dibahas analisis dinamika benda fleksibel di daerah plastis. Pembahasan dipusatkan pada konsep penyerapan energi oleh benda yang mengalami deformasi plastis, pengembangan alat yang digunakan untuk mengukur kurva vs deformasi struktur yang berguna untuk mengevaluasi penyerapan energi oleh benda tersebut, pengembangan alat yang digunakan untuk mengukur sifat material pada laju regangan tinggi, yang sangat penting untuk memodelkan sifat material, yaitu kurva tegangan-regangan pada pembebanan dengan laju regangan yang berbeda-beda. Di bagian ini, diberikan contoh bagaimana pembuatan model MEH dan model material diterapkan dalam berbagai studi. Salah satu studi yang dibahas adalah desain dan analisis struktur *aluminum foam sandwich* (AFS) yang dipasang pada struktur kendaraan pengangkut personel lapis baja buatan PT PINDAD sehingga daya tahannya terhadap beban ledakan meningkat. Contoh berikutnya adalah penelitian mengenai kelaiktabrakan kereta cepat yang saat

ini sedang dikembangkan melalui kerjasama beberapa universitas dengan PT INKA. Kemampuan melakukan analisis masalah dinamik ini diharapkan akan dapat mendukung industri kendaraan tempur dan kereta api di Indonesia untuk menjadi semakin baik.

5 UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan pada pimpinan dan segenap anggota Forum Guru Besar ITB atas dukungannya sehingga penulis mendapat amanah jabatan sebagai guru besar, melaksanakan orasi ilmiah, dan menerbitkan buku ini.

Terima kasih yang sebesar-besarnya untuk mendiang istri dan kedua anak yang selalu mendukung penulis dalam pengembangan karier, serta menemani dalam berbagai kegiatan sehari-hari dengan sabar dan setia.

Terima kasih pada bapak-ibu dan bapak-ibu mertua, yang semuanya sudah meninggal, atas kepercayaan yang diberikan saat penulis memilih dan menjalani karier sebagai dosen. Juga kepada para saudara, ipar, keponakan yang banyak berinteraksi dan memberi dukungan, perhatian, dan doa.

Terima kasih pada pimpinan FTMD, Prof. Tatacipta Dirgantara, Prof. Lavi R. Zuhail, Dr. Hermawan Judawisastra atas dukungan yang luar biasa sehingga jabatan akademik guru besar dapat dicapai. Terima kasih juga disampaikan kepada Senat FTMD atas dukungannya.

Terima kasih kepada para pemberi rekomendasi, Prof. Dwiwahju Sasongko, Prof. Hari Muhammad, Prof. Mulyadi Bur (Universitas Andalas), Prof. Ivan Uhlir (CZU), Dr. Ing. Gabriela Achtenova (CTU), Prof. Wahyu Kuntjoro (UITM), dan Dr. Soerjanto Tjahjono (KNKT).

Terima kasih kepada Prof. Harijono Djodjodhardjo yang telah mengenalkan bidang keilmuan yang saya tekuni dan mengajak sebagai dosen, kepada rekan-rekan yang telah banyak berinteraksi dalam berbagai kegiatan penelitian, Prof. Ichsan Setya Putra, Prof. Bambang Kismono Hadi, Prof. Tatacipta Dirgantara, Prof. Zainal Abidin, Prof. Lavi R. Zuhail, Dr. Hermawan Judawisastra, Dr. Sigit Puji Santosa, Dr. Mochammad Agoes Moelyadi, Ir. Muhammad Kusni M.T., Dr. Djarot Widagdo, Dr. Yunendar Aryo Handoko, Dr. Rianto Adhy Sasongko, Dr. Satrio Wickasono, Dr. Mahesa Akbar, Dr. Annisa Jusuf, Dr. Afdhal, Dr. Ditho Ardiansyah Pulungan, Dr. Arief Nur Pratomo.

Terima kasih juga kepada seluruh staf FTMD yang tidak dapat disebutkan satu per satu untuk kerja sama dan interaksi yang baik dalam berbagai

kegiatan tri dharma. Juga kepada tenaga kependidikan FTMD yang mendukung proses administrasi dalam berbagai kegiatan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adrian, N., Gunawan, L., Dirgantara, T. & Putra, I. S., 2011. *Perancangan Awal Alat Uji Split Hopkinson Pressure Bar untuk Mengukur Sifat Mekanik Material Pada Laju Regangan Tinggi*. Malang, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, pp. 794-802.
- Afdhal, 2015. *Development of Split Hopkinson Pressure Bar to Measure Mechanical Properties of Materials at High Strain Rates*, s.l.: s.n.
- Afdhal, Gunawan, L., Dirgantara, T. & Santosa, S. P., 2021. Experimental Work for Bar Straightness Effect Evaluation of Split Hopkinson Pressure Bar. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 53(6), p. 123501249.
- Afdhal, et al., 2022. On capturing rate-dependent anisotropic behavior of sheet metal forming using a viscoplastic computational framework (i). *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, pp. 1-15.
- Afdhal, et al., 2016. *Numerical Simulation for Bar Straightness Effect in Split Hopkinson Pressure Bar*. New Delhi, Procedia Engineering, pp. 615-622.
- Afdhal, et al., 2014. Measurement of ST37 Material at High Strain Rates Using a Split Hopkinson Pressure Bar. *Applied Mechanics and Materials*, Volume 660, pp. 562-566.
- Afdhal, et al., 2016. *Numerical Simulation of SHPB to Measure the Mechanical Properties of Aluminium Foam Material at High Strain Rate by Using MAT 163 Modified Crushable Foam*. Yogyakarta, AIP Conf. Proceeding.
- Afdhal, Jusuf, A., Kariem, M. A. & Gunawan, L., 2016. Development of a Numerical Model for Simulations of Split Hopkinson Pressure Bar. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(10), pp. 6657-6662.
- Agung, R., 2023. *Experimental Characterization of a Piezoelectric Composite Sensor for a Flexible Panel of Microsatellite*, Bandung: Program Studi Teknik Dirgantara, FTMD ITB.
- Aini, F. N., 2022. *Kajian Aplikasi Tunnel Mass Damper pada Struktur Fleksibel Akibat Eksitasi Angin Menggunakan Metode Element Hingga*, Bandung: Program Studi Teknik Dirgantara, FTMD ITB.
- Akbar, M. et al., 2022. Evaluation of Piezoelectric Energy Harvesting Potention of a Jet Transport Aircraft Wing with Multiphase Composite using Iterative Finite Element Method. *International Journal of Technology*, pp. 803-815.

- B. S. Nasional, 2019. *SNI 8826, Jakarta*, Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Bisplinghoff, R. L., Ashley, H. & Halfman, R. L., 1957. *Aeroelasticity*. 2nd ed. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, Inc..
- Brantas, T. B., 2023. *Evaluation on Piezoelectric Energy Harvesting from Vortex-Induced Vibration by means of Multiphysics Numerical Analysis*, Bandung: Program Studi Teknik Dirgantara, FTMD ITB.
- CAA, 2018. *In-flight Breakup: Van's Aircraft Incorporated RV-7 ZK-DKS*, Northland: CAA Safety Investigation Report.
- Chen, W. & Song, B., 2011. *Split Hopkinson (Kolsky) Bar*. New York: Springer.
- Christian, M. K. & Magnus, O. V., 2010. *Blast loading on square steel lates; A comparative study of numerical methods*, Norwegia: Norwegian University of Sciences and Technology.
- Dirgantara, 2018. Crashworthiness analysis of foam-filled square column considering strain rate effect of the foam. *Thin-Walled Structures*, Volume 129, pp. 365-380.
- Dirgantara, T. et al., 2022. *Laporan Akhir Analisis Kelaik-tabrakan (Crashworthiness) Kereta Cepat Merah Putih*, Bandung: ITB.
- Djojodihardjo, H., 2023. *Introduction to Aeroelasticity: With Case-Studies*. Singapore: Springer.
- Dunand, M., Gary, G. & Mohr, D., 2012. *High Strain Rate Tensile Testing of Sheet Materials Using Three Hopkinson Pressure Bar*. s.l., s.n., pp. 1-4.
- European Committee for Standardization, 2020. *EN 15227: 2020 Railwal applications - Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies*. Brussels: CEN.
- Fadillah, H. et al., 2020. Dynamic High Strain Rate Characterization of Lithium-ion Nickel-Cobalt-Aluminum (NCA) Battery Using Split Hopkinson Tensile/Pressure Bar Methodology. *Energies*, 13(5061).
- Fariduzzaman, Gunawan, L., Zuhail, L. R. & Nasution, A., 2004. Uji Aeroelastik Model Penuh Pada Jembatan Cable Stayed. *Jurnal Teknik Sipil*, 11(2), pp. 89-103.
- Fleck, N. & Deshpande, V., 2004. The Resistance of Clamped Sandwich Beams to Shock Loading. *Journal of Applied Mechanics*, 71(3), pp. 386-401.
- Flickr, Inc., 2024. *flickr*. [Online] Available at: <https://www.flickr.com/> [Accessed 2024].

- Furqan, A. et al., 2016. *Blast Impact Analysis of Stiffened and Curved Panel Structures*. New Delhi, Procedia Engineering, pp. 487-494.
- Furqon, A. et al., 2021. *Investigation on The Implementation of Artificial Damping System on High-rise Building Under Wind Loading*. Online, Online Symposium on Aeroelasticity, Fluid-Structure Interaction, and Vibrations.
- Gallina, F., Birch, R. S. & Alves, A., 2003. *Design of A Split Hopkinson Bar*. Sao Paulo, s.n.
- Gao, G. & Wang, S., 2019. Crashworthiness of Passenger Rail Vehicle: a Review. *International Journal of Crashworthiness*, 24(6), pp. 664-676.
- George T. (Rusty) Gray, I., 2000. Classic Split-Hopkinson Pressure Bar Testing. In: *ASM HANDBOOK Vol. 8: Mechanical Testing and Evaluation*. Ohio: ASTM International.
- Gunawan, L., Dirgantara, T. & Putra, I. S., 2011. Development of a Dropped Weight Impact Testing Machine. *International Journal of Engineering & Technology*, 11(6), pp. 120-126.
- Gunawan, L., Farassamulya, M. H., Kuswoyo, A. & Dirgantara, T., 2021. Development of Laboratory-scale Lamb Wave-based Health Monitoring System for Laminated Composites. *Journal of Engineering and Technological Sciences*.
- Gunawan, L., Jusuf, A., Dirgantara, T. & Putra, I. S., 2013. Experimental Study of Foam Filled Aluminum Columns under Axial Impact Loading. *KONES Journal of Powertrain and Transport*, 20(2), pp. 149-157.
- Gunawan, L. et al., 2024. *Characterization of Mechanical Properties of Aluminum Foam at High Strain Rate using SHPB Test*. Freiburg, (to be Presented).
- Gunawan, L., Sitompul, S. A., Dirgantara, T. & Putra, I. S., 2012. *Dynamic Simulations of A Split Hopkinson Pressure Bar*. Ho Chi Minh City, s.n., pp. 401-407.
- Gunawan, L., Sitompul, S. A., Dirgantara, T. & Putra, I. S., 2013. Material Characterization and Axial Crushing Tests of Single and Double-Walled Columns at Intermediate strain rate. *Journal of Mechanical Engineering*, 10(2), pp. 19-36.
- Haines, J., Knight, C. & Glaser, R., 2007. *Design and Characteristics of a Split Hopkinson Pressure Bar Apparatus*, s.l.: s.n.
- Haq, L. F., 2023. *Pengembangan model numerik coupler, crash buffer, dan anti-climber Kereta Cepat Merah Putih*, Bandung: Program Studi Teknik Dirgantara, FTMD ITB.

- Hodges, D. H. & Pierce, G. A., 2011. *Introduction to Structural Dynamics and Aeroelasticity*. 2nd ed. s.l.:Cambridge University Press Inc..
- Hopkinson, J., 1872. Further Experiments on The Rupture of Iron Wire. *Manchester Lit Phil Soc. Proc.*, pp. 119-121.
- Hopkinson, J., 1872. On The Rupture of Iron Wire by a Blow. *Manchester Lit Phil Soc. Proc.*, pp. 40-45.
- Huang, X., Lu, G. & Yu, T. X., 2002. On the axial splitting and curling of circular metal tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 44, pp. 2369-2391.
- Inman, D. J., 2014. *Engineering Vibrations*. 4th ed. s.l.:Pearson.
- Izzuddin, M. A. et al., 2021. *Flutter Analysis of Jet Fighter Aircraft Anisogrid Composite Wing Structure*. Online, Online Symposium on Aeroelasticity, Fluid-Structure Interaction, and Vibrations.
- Jusuf, A., Allam, F. S., Dirgantara, T. & Putra, I. S., 2011. Low Velocity Impact Analyses of Prismatic Columns using Finite Element Method. *Key Engineering Materials*, Volume 462-463, pp. 1308-1313.
- Jusuf, A., Dirgantara, T., Gunawan, L. & Putra, I. S., 2015. Crashworthiness analysis of multi-cell prismatic structures. *International Journal of Impact Engineering*, Volume 78, pp. 34-50.
- Kaiser, M. A., 1998. *Advancements in the Split Hopkinson Bar Test*, Blacksburg: Mechanical Engineering - Virginia Polytechnic Institute and State university.
- Kevin, A., 2022. *Dynamic Response of a Flexible Spacecraft Structure due to Attitude Control Generated Motion*, Bandung: Program Studi Teknik Dirgantara, FTMD ITB.
- Kevin, A., 2023. *Pemodelan Numerik Piezoelektrik Berdasarkan Metode Analogi Termal untuk Tujuan Structural Health Monitoring*, Bandung: Program Studi Teknik Dirgantara, FTMD ITB.
- Kolsky, H., 1949. An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading. *Proc. Phys. Soc. B*, pp. 676-700.
- Kumar, A. P., Jusuf, A., Santosa, S. P. & Dirgantara, T., 2019. Investigations on The Influence of Spherical Caps in the Axial Impact Characteristics of Press-Formed Cylindrical Tubular Structures. *Advances in Structural Engineering*.
- Kumar, A. P. et al., 2018. Axial crash performance of press-formed open and end-capped cylindrical tubes – A comparative analysis. *Thin-Walled Structures*, Volume 124 , p. 468–488.

- Laboratorium Struktur Ringan - FTMD ITB, 2021. *Pengembangan Produk Struktur Tahan Ledak untuk Kendaraan Tempur*, Bandung: LPiK - ITB.
- Li, Y. & You, Z., 2018. External Inversion of Thin-walled Corrugated Tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 144, pp. 54-66.
- Long, C. R., Yuen, S. C. K. & Nurick, G. N., 2019. Analysis of a car door subjected to side pole impact. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 16(8), pp. 1-17.
- Luo, M. et al., 2019. Energy absorption of expansion tubes using a conical-cylindrical die: Theoretical model. *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 157-158, pp. 207-220.
- Macaulay, M., 1987. *Introduction of Impact Engineering*, Chapman and Hall, 1987.. s.l.:Chapman and Hall.
- Ma, C. Y. & Liew, J. Y., 2013. Blast and ballistic resistance of ultra high strength steel. *International Journal of Protective Structures*, Volume 4, pp. 379-413.
- Moelyadi, M. A., Sulthoni, M., Bura, R. & Zain, R., 2022. *Pengembangan Wahana Udara Tanpa Awak "High Altitude Long Endurance (HALE)" Skala Industri Guna Keperluan "Aerial Surveillance" Batas Wilayah NKRI*, Bandung: LPiK ITB.
- NATO, 2012. *STANAG 4596: Protection Levels for Occupants of Armoured Vehicles*. Breussels: s.n.
- NTSB, 2011. *Aircraft Accident Brief: Pilot/Race 177, The Galloping Ghost*, Nevada: National Transportation Safety Board.
- Nugraha, M. F. A., 2023. *Analisis numerik kelaiktabrakan pada sambungan intercar Kereta Cepat Merah Putih*, Bandung: Program Studi S1 Teknik Dirgantara, FTMD ITB.
- Nuralamsyah, R., 2023. *Analisis Numerik Pengaruh Sifat Material Maskara terhadap Performa Kelaiktabrakan Kereta Cepat Merah Putih*, Bandung: Program Studi S1 Teknik Dirgantara, FTMD ITB.
- Palacios, R. & Cesnik, C. E., 2023. *Dynamics of Flexible Aircraft: Coupled Flight Mechanics, Aeroelasticity, and Control*. s.l.:Cambridge University Press.
- Park, C., Huh, H. & Park, J., 2014. Rate-Dependent Hardening Model for Polymer-bonded Explosives with an HTPB Polymer Matrix Considering a Wide Range of Strain Rates. *Journal Composite Material*, 49(4), pp. 425-438.
- Perkasa, R. E., Gunawan, L., Santosa, S. P. & Afdhal, 2023. Mechanical Anisotropy of Cold-Rolled ST-37 Steel Plate Under High Strain Rates Loadings. *International Journal of Mechanical Engineering Technologies & Applications*, pp. 198-211.

- Pratomo, A. N., 2020. *Desain dan Analisis Pelindung Tambahan Kendaraan Tempur untuk Memenuhi Kelaikan Ledak Struktur (Structural Blastworthiness)*, Bandung: Program Studi Teknik Dirgantara, FTMD ITB..
- Pratomo, A. N. et al., 2020. Numerical study and experimental validation of blastworthy structure using aluminum foam sandwich subjected to fragmented 8 kg TNT blast loading. *International Journal of Impact Engineering*.
- Pratomo, A. N. et al., 2021. Design optimization and structural integrity simulation of aluminum foam sandwich construction for armored vehicle protection. *Composite Structures*, Volume 276, pp. 1-19.
- Pulungan, D. A., 2010. *Analysis of Cylindrical Thin-walled Column Subjected to Axial Impact Loading Considering Strain Rate Effect*, Bandung: Program Studi Teknik Dirgantara, FTMD ITB.
- Putra, I. S., Gunawan, L. & Akbar, M., 2023. *Implementasi Aluminium Alloy dan High Strength Steel sebagai Material Tangki*, Bandung: Yayasan LAPI ITB.
- Ramadhani, M. et al., 2021. *On the Aeroelastic Study of a Multi Boom Tandem Wing HALE UAV Configuration*. Online, University of Porto, pp. 99-104.
- Ramadhani, M. J., 2022. *Crack Behaviour Evaluation of Composite Wings Under Aeroelastic Loads Utilizing Coupled RANS and XFEM*, Bandung: Program Studi Teknik Dirgantara, FTMD ITB.
- Rayhan, S. B. & Pu, X., 2023. Crashworthiness Study of a Newly Developed Civil Aircraft Fuselage Section with Auxiliary Fuel Tank Reinforced with Composite Foam. *Aerospace*, 10(314), pp. 1-14.
- Robertson, K. D., Chou, S.-C. & Rainey, J. H., 1971. *Design and Operating Characteristics of A Split Hopkinson Pressure Bar Apparatus*, Watertown, Massachussets: s.n.
- Rosidah, F. A., 2023. *Analisis Persepsi Manusia Terhadap Getaran Akibat Beban Angin pada Gedung Tinggi*, Bandung: Program Studi Teknik Dirgantara, FTMD ITB.
- Santosa, S. P. et al., 2016. *Response Analysis of Blast Impact Loading of Metal-Foam Sandwich Panels*. New Delhi, Procedia Engineering, pp. 495-502.
- Saputra, A. D., Gunawan, L., Sasongko, R. A. & Akbar, M., 2021. *Flutter Derivatives Identification of Long-Span Bridges Wind Tunnel Test Models Using Free Vibration Technique*. Online, Online Symposium on Aeroelasticity, Fluid-Structure Interaction, and Vibrations.

- Setiawan, R. & Sari, D. Y., 2010. Preparation of the Internal Inversion Impact Absorbent Module Data Base. *Jurnal Teknik Mesin*, Volume 12, pp. 35-42.
- Shakeri, M., Salehghaffari, S. & Mirzaeifar, R., 2007. Expansion of circular tubes by rigid tubes as impact energy absorbers: Experimental and theoretical investigation. *International Journal of Crashworthiness*, Volume 12, pp. 493-501.
- Shutterstock, Inc., 2024. *Shutterstock*. [Online] Available at: <https://www.shutterstock.com/> [Accessed 2024].
- Sun, Y., Cole, C., Dhanasekar, M. & Thambiratnam, D., 2012. Modelling and Analysis of the Crush Zone of a Typical Australian Passenger Train. *Vehicle System Dynamic*, 50(7), pp. 1137-1155.
- Syamsuar, S., Gunawan, L., Widiramdhani, M. & Kartika, N., 2017. The Design and Experiment of Ground Vibration Test of N219 Aircraft Half Wing Model. *Warta Ardhia*, 42(3), pp. 117-122.
- Tanimura, S., Hayashia, H., Yamamoto, T. & Mimura, K., 2009. Dynamic Tensile Properties of Steels and Aluminum Alloys for a Wide Range of Strain Rates and Strain. *Journal of Solid Mechanics and Material Engineering*, pp. 1263-1273.
- Tasneem, N., 2005. *Study of Wave Shaping Techniques of Split Hopkinson Pressure Bar Using Finite Element Analysis*, Wichita: Mechanical Engineering - Wichita State University.
- Trong, N. V. et al., 2014. Stress Analysis of the Impactor Assembly of the Dropped Weight Impact Testing Machine. *Applied Mechanics and Materials*, Volume 660, pp. 567-571.
- UIC, 2002. *UIC-651 - Layout of Driver's Cabs in Locomotives, Railcars, Multiple Unit Trains and Driving Trailers*. 4th ed. s.l.:s.n.
- Wikipedia, 2024. https://en.wikipedia.org/wiki/Traffic_barrier. [Online] Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Traffic_barrier
- Wu, T. & Kareem, A., 2013. Bridge aerodynamics and aeroelasticity: A comparison of modeling schemes. *Journal of Fluids and Structures*, Volume 43, pp. 347-370.
- Yaffie, F., Handoko, Y. A., Gunawan, L. & Putra, E. D. J., 2023. *Influence of Carbody Flexibility on Vertical Vibration Level of Rail Vehicle*. Yogyakarta, s.n.
- Zhang, H. et al., 2020. Multistage Impact Energy Distribution for Whole Vehicle in High-speed Train Collisions: Modelling and Solution

Methodology. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(4), pp. 2486-2499.

CURRICULUM VITAE



Nama : Leonardo Gunawan
Tempat/tgl lahir : Palembang, 11 November 1962
Kel. Keahlian : Dinamika dan Kendali
Alamat Kantor : FTMD ITB
Nama Istri : Veronica Dwiwati Veranda (Alm.)
Nama Anak : Priska Kristanti Retnadewi
Regina Dyani Dwiharini

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- S3 Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, 1988
- S1 Teknik Mesin ITB, 1987

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

- Kepala Pusat Pengembangan Teknologi Transportasi Berkelanjutan, 2021-2023,
- Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin, Teknik Dirgantara, Ilmu dan Teknik Material, 2018-2020,
- Ketua Program Studi Magister dan Doktor Teknik Mesin, Aeronotika dan Astronotika, dan Teknik Material, 2016-2017,
- Ketua Program Studi Magister dan Doktor Teknik Mesin, Aeronotika dan Astronotika, dan Teknik Material, 2014-2015,
- Ketua Program Studi Sarjana Aeronotika dan Astronotika, , 2008-2011.
- Staf Pengajar Fakultas Tekni Mesin dan Dirgantara, 1989-sekarang.

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

1. Pembina Utama Muda, IV/c, 1 Oktober 2020
2. Pembina Tk.I, IV/b, 1 Oktober 2018
3. Pembina, IV/a, 1 Oktober 2016
4. Penata Tk.I, III/d, 1 Oktober 2014
5. Penata, III/c, 1 April 2002
6. Penata Muda Tk.I, III/b, 1 April 2000
7. PNS, Penata Muda, III/a, 1 November 1990
8. CPNS, III/a, 1 Oktober 1989,

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

1. Guru Besar, 1 Juni 2023
2. Lektor Kepala, 1 Juli 2014
3. Lektor, 1 Januari 2002
4. Asisten Ahli, 1 Agustus 1999
5. Asisten Ahli Madya, 1 Juni 1992,

V. KEGIATAN PENELITIAN (10 TAHUN TERAKHIR)

Sebagai Ketua Tim

1. Aerofractureelasticity pada Struktur Komposit yang Memiliki Retak dan Delaminasi, Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat dan Inovasi (P2MI) Kelompok Keahlian ITB, 2023
2. Pengembangan Model Tuned Mass Damper untuk Struktur Gedung Tereksitasi Beban, Riset ITB, 2021
3. Piezoaeroelastic Energy Harvesting untuk Sayap Pesawat Jet Transport yang Tereksitasi Beban Gust, P2MI Kelompok Keahlian ITB, 2021
4. Karakterisasi Material pada Laju Regangan Tinggi dengan Memperhitungkan Pengaruh Arah Butir dan Penyempurnaan Teknik Split Hopkinson Bar, Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi (PDUPT) Kemenristek Dikti, 2018-2020
5. Pemodelan dan Analisa Kerusakan (Damage) Struktur Panel Komposit Menggunakan Ultrasonic C-Scan, PDUPT Kemenristek Dikti, 2018- 2020
6. Karakterisasi Material Pada Laju Regangan Tinggi dan Penyempurnaan Teknik Split Hopkinson Bar, PDUPT Kemenristek Dikti, 2015-2016
7. Pengembangan Split Hopkinson Tension Bar Guna Karakterisasi Sifat Mekanik Material pada Laju Regangan Tinggi, PDUPT Kemenristek Dikti, 2016
8. Pengembangan Model Interaksi Fluida-Struktur Untuk Analisis Blast Impact Pada Struktur Berpenguat, PDUPT Kemenristek Dikti, 2015

Sebagai Anggota Tim

1. Kaji Teoretik dan Numerik Kelaikan Tabrak Crash Box Prismatic dengan Berbagai Bentuk Penampang untuk Keselamatan Transportasi, PDUPT Kemenristek Dikti, 2020
2. Pengembangan Material Maju untuk Aplikasi Deep Drawing dalam Rangka Meningkatkan Daya Saing Industri Logam dalam Negeri, Rise Multidisiplin ITB, 2020

3. Kaji Teoretikal, Numerikal dan Eksperimental Crash Box Sudut Jamak yang Dikenai Beban Aksial Kuasi-Statik, PDUPT Kemenristek Dikti, 2019
4. Desain dan Analisis Struktur Wahana Terbang Hybrid VTOL untuk Misi Short-Range Goods Delivery, Program Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat, dan Inovasi (P3MI) Kelompok Keahlian ITB, 2019
5. Kolom Prismatic Penyerap Energi Tabrakan Berbentuk Top Hat Tapered untuk Aplikasi Struktur Laik Tabrak, P3MI Kelompok Keahlian ITB, 2019
6. Pengembangan Wahana Terbang Rotorcraft/Multi-rotor untuk Misi Short-Range Goods Delivery, P3MI Kelompok Keahlian ITB, 2018
7. Pengembangan Metodologi Analisis dan Perangkat Lunak untuk Metode Analisis Tenggang Cacat pada Kulit Struktur Badan Pesawat Terbang yang Mengalami Perbaikan, P3MI Kelompok Keahlian ITB, 2018
8. Mekanika Impak untuk Kolom Prismatic dengan Berbagai Penampang, P3MI Kelompok Keahlian ITB, 2018
9. Design Review Kereta LRT (Light Rail Transit) untuk Kawasan Jabodebek, Kemenristek Dikti, 2018
10. Pengembangan Produk Struktur Tahan Ledak Untuk Kendaraan Tempur, Lembaga Pengelolaan Dana Pendidikan (LPDP), 2017-2018
11. Perancangan dan Implementasi Sistem Keselamatan Pasif pada Struktur Kereta Penumpang, LPDP, 2018
12. Material Modeling and Development of Ultralight Metal Structures Applicable for Railway Vehicles, Royal Academy of Engineering - Newton Fund UK, 2017
13. Desain Dan Analisis Struktur Tahan Ledak Dengan Konfigurasi Sandwich Untuk Aplikasi Kendaraan Tempur, Pendidikan Magister menuju Doktor untuk Sarjana Unggul (PMDSU) Kemenristek DIKTI, 2017
14. Kaji Parametrik Struktur Crash Box Double-Hat Multi-Corner Untuk Keselamatan Alat Transportasi, PDUPT Kemenristek Dikti, 2017
15. Pengembangan Produk Kereta Railink Dengan Kriteria Standar NVH (Noise, Vibration and Harshness), Kemenristek Dikti, 2017
16. Perancangan Dan Kajian Manufaktur Komponen Automotif untuk Aplikasi Struktur Laik Tabrak, P3MI Kelompok Keahlian ITB, 2017
17. Pengembangan Produk Laik Tabrak dengan Mempertimbangkan Aspek Manufaktur, P3MI Kelompok Keahlian ITB, 2017
18. Desain dan Pengembangan Struktur Crash Box bersudut Jamak untuk Meningkatkan Keselamatan Alat Transportasi, P3MI Kelompok Keahlian ITB, 2017

19. Kaji Parametrik Karakteristik Laik Tabrak Struktur Crash Box yang Diisi dengan Aluminum Foam, Kemenristek Dikti, 2017
20. Kaji Pengaruh Laju Regangan Busa Aluminum terhadap Karakteristik Laik Tabrak pada Crash Box”, PDUPT Kemenristek DIKTI, 2016
21. Perancangan dan Implementasi Sistem Keselamatan Pasif Pada Struktur Kereta Penumpang, Kemenristek DIKTI, 2016
22. Petalling Damage Analysis of Metallic Plate Under Localised Impact Load, Analitical analysis of clamped load metal plate blast, ASEAN University Network – Southeast Asia Engineering Education Development Network (AUN-SEED-Net), 2016
23. Structural Impact, Analytical analysis of clamped load metal plate blast”, AUN-SEED-Net, 2016
24. Penyusunan Prosedur Perancangan Crashbox Berdasarkan Kriteria Crashworthiness, PDUPT Kemenristek DIKTI, 2015
25. Perancangan Struktur Alat Transportasi Untuk Pengelolaan Energi Tabrakan, PDUPT Kemenristek DIKTI, 2015
26. Blast and Impact Dynamic, AUN-SEED-Net, 2014
27. Analitical analysis of clamped load metal plate blast, AUN-SEED-Net, 2014
28. Blast and Dynamic Impact, AUN-SEED-Net, 2014
29. Development of Vehicle Crash Box Design Structure to Improve Crashworthiness of Vehicle”, AUN-SEED-Net, 2014

VI. PUBLIKASI (10 TAHUN TERAKHIR)

a. Publikasi Ilmiah Internasional

1. Nguyen, C.N., Jusuf, A., Dirgantara, T., Gunawan, L., & Santosa, S.P., Putra, I.S. (2023). Improved extensional crushing mechanics of prismatic columns with various cross-sections. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 0(0). doi:10.1177/14644207231191652
2. Perkasa, R.E., **Gunawan, L.**, Santosa, S.P., & Afdhal (2023). Mechanical Anisotropy of Cold-Rolled ST-37 Steel Plate Under High Strain Rates Loadings. *International Journal of Mechanical Engineering Technologies & Applications*, 4(2), 198-211. doi:10.21776/MECHTA.2023.004.02
3. Akbar, M., Ramadhani, M. J., Izzuddin, M. A., **Gunawan, L.**, Sasongko, R.A., Kusni, M., & Curiel-Sosa, J. L. (2022). Evaluation of Piezoaeroelastic Energy Harvesting Potential of a Jet Transport Aircraft Wing with

- Multiphase Composite using Iterative Finite Element Method (i). *International Journal of Technology*, 13(4). doi:10.14716/ijtech.v13i4.5468
4. Biharta, M. A. S., Santosa, S. P., Widagdo, D., & **Gunawan, L.** (2022). Design and Optimization of Lightweight Lithium-Ion Battery Protector with 3D Auxetic Meta Structures, *World Electric Vehicle Journal*, 13(7), 664-675. doi: 10.3390/wevj13070118
 5. Ihsan, M. N., Santosa, S.P., **Gunawan, L.**, & Budiwantoro, B. (2022). Design and optimization of anti-climber device for light rail transit crash energy management system, *International Journal of Crashworthiness*, 28(5), 664-675. doi:10.1080/13588265.2022.2116310
 6. Afdhal, **Gunawan, L.**, Dirgantara, T., Santosa, S. P., Adziman, F., & Pulungan, D.A. (2022). On capturing rate-dependent anisotropic behavior of sheet metal forming using a viscoplastic computational framework. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 31(3), 518-532. doi:10.1080/13588265.2022.2116310
 7. Afdhal, **Gunawan, L.**, Dirgantara, T., & Santosa, S.P. (2021). Experimental Work for Bar Straightness Effect Evaluation of Split Hopkinson Pressure Bar. *Journal of Engineering and Technological Sciences*. 53(6), Article 210613. doi:10.5614/j.eng.technol.sci.2021.53.6.13
 8. Pratomo, A. N., Santosa, S. P., **Gunawan, L.**, Widagdo. D., & Putra, I. S. (2021). Design optimization and structural integrity simulation of aluminum foam sandwich construction for armored vehicle protection. *Composite Structures*, 276, Article 114461. doi:10.1016/j.compstruct.2021.114461
 9. **Gunawan, L.**, Farrasamulya, M., H., Kuswoyo, A, & Dirgantara, T. (2021). Development of Laboratory-scale Lamb Wave-based Health Monitoring System for Laminated Composites, *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 53(4), Article 210407. doi:10.5614/j.eng.technol.sci.2021.53.4.7
 10. Hussain, N. N., Regalla, S. P., Rao, Y. V. D., Dirgantara, T., **Gunawan, L.**, & Jusuf, A. (2021). Drop-weight impact testing for the study of energy absorption in automobile crash boxes made of composite material. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 235(1), 114-130. doi:10.1177/1464420720952
 11. Pratomo, A. N, Santosa, S. P, **Gunawan, L.**, & Putra, I. S. (2020). Countermeasures design and analysis for occupant survivability of an armored vehicle subjected to blast load. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 34(5), 1893-1899, doi:10.1007/s12206-020-0411-1

12. Pratomo, A. N., Santosa, S. P., **Gunawan, L.**, Widagdo, D., & Putra, I. S. (2020). Numerical study and experimental validation of blastworthy structure using aluminum foam sandwich subjected to fragmented 8 kg TNT blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, 146, Article 103699. doi:10.1016/j.ijimpeng.2020.103699
13. Fadillah, H., Santosa, S. P., **Gunawan, L.**, Afdhal, A., & Purwanto, A. (2020). Dynamic High Strain Rate Characterization of Lithium-ion Nickel-Cobalt-Aluminum (NCA) Battery Using Split Hopkinson Tensile/Pressure Bar Methodology. *Energies*, 13(19), Article 5061. doi:10.3390/en13195061
14. Kumar, A. P., Afdhal, Jusuf, A., & **Gunawan, L.** (2020). Significance of material constitutive model and forming parameters on the crashworthiness performance of capped cylindrical tubular structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 234(2), 320-334. doi:10.1177/1464420719887408
15. Santosa, S. P., **Gunawan, L.**, Jusuf, A., Arifurrahman, A., Akbar, I., Anh, L. H., Ab Rashid, A. A., Abu Kassim, K. A., & Ahmad, Y. (2020). A Study on the Use of Child Restraint System (CRS) in Indonesia and Vietnam. *Journal of the Society of Automotive Engineers Malaysia*. 4(3), 323-337. doi: 10.56381/jsaem.v4i3.26
16. Nurhakim, M. L. I., Santosa, S. P., Jusuf, A., **Gunawan, L.**, Abu Kassim, K. A., & Ahmad, Y.. (2019). Aluminium-based Light-weight Bus Superstructure Design to Comply to Global Rollover Regulations. *Journal of the Society of Automotive Engineers Malaysia*, 3(1), 96-111. doi: 10.56381/jsaem.v3i1.108
17. Santosa, S. P., Jusuf, A., **Gunawan, L.**, Abu Kassim, K. A., Hakim, M. L., & Wiranto. B. P. E. (2021). Rollover Risk Probability Analysis for SUVs and MPVs in the ASEAN Market. *Journal of the Society of Automotive Engineers Malaysia*. 2(3), 275-288. doi:10.56381/jsaem.v2i3.99
18. Dirgantara, T., Jusuf, A., Kurniati, E. O., **Gunawan, L.**, & Putra, I. S. (2018). Crashworthiness analysis of foam-filled square column strain rate effect of the foam. *Thin-Walled Structures*. Vol. 129, 365-380. doi: https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.04.004
19. Kumar, A. P., Nalla, M. M., Jusuf, A., Dirgantara, T., & **Gunawan, L.**, Axial crash performance of press-formed open and end-capped cylindrical tubes - A comparative analysis. *Thin Walled Structures*, Vol. 124, 468-488. Doi https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.12.037

20. Nisa, A.K., Ndaomanu, Y. A., Sasongko, R.A., **Gunawan, L.**, Mulyanto, T., & Jusuf, A. (2018). Flutter Analysis of High Aspect Ratio Wing of Sailplane Aircraft. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(4.25), 173-180. doi: 10.14419/ijet.v7i4.25.22420
21. Haryanto, I., Raharjo, F. A., Kurdi, O., Haryadi, G. D., Santosa, S. P., & **Gunawan, L.**, Optimization of Bus Body Frame Structure for Weight Minimizing with Constraint of Natural Frequency using Adaptive Single-Objective Method. *International Journal of Sustainable Transportation Technology*. 1(1), 9-14. doi:10.31427/IJSTT.2018.1.1.2
22. Afdhal, Jusuf, A., Kariem, M. A., & **Gunawan, L.** (2016). Development of a Numerical Model For Simulations of Split Hopkinson Pressure Bar. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(10), 6657-6662
23. Jusuf, A., Dirgantara, T., **Gunawan, L.**, & Putra, I. S. (2015). Crashworthiness analysis of multi-cell prismatic structures. *International Journal of Impact Engineering*, 78, 34-50. doi:10.1016/j.ijimpeng.2014.11.011
24. Dimas, A., Dirgantara, T., **Gunawan, L.**, Jusuf, A., & Putra, I. S. (2014). The Effect of Spot Weld Pitch to the Axial Crushing Characteristic of Top-Hat Crash Box, *Applied Mechanics and Materials*, 660, 578-582. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.660.578
25. Afdhal, **Gunawan, L.**, Santosa, S. P., Putra, I. S., & Huh, H. (2014). Measurement of Mechanical Properties of St 37 Material at High Strain Rates Using a Split Hopkinson Pressure Bar. *Applied Mechanics and Materials*, 660, 562-566. doi: doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.660.562

b. Publikasi Jurnal Nasional (terakreditasi)

1. Andria, N., Zuhail, L. R., **Gunawan, L.**, & Muhammad, H. (2019). Metoda Corotational Beam 2D untuk Analisis Statik Struktur Nonlinier Geometrik. *Jurnal Teknologi Dirgantara*, 17(1), 79-90. doi:10.30536/j.jtd.2019.v17.a3117

c. Publikasi Jurnal Nasional (lainnya)

1. Pratomo, A. N., Santosa, S. P., **Gunawan, L.**, Putra, I. S., Dirgantara, T., Widagdo, D., & Masyhur, A. H. (2019). Numerical Study of Experiment Setup for Aluminum Foam Sandwich Construction Subjected to Blast Load. *MESIN*. 27(1). doi:10.5614/MESIN.2018.27.1.3
2. Tam, L. H., Santosa, S. P., **Gunawan, L.**, & Jusuf, A. (2016). The Influence of Sheet Metal Foaming on The Axial Crushing Analysis of Top-Hat Columns. *MESIN*. 25(1). pp.41-53. doi: 0.5614/MESIN.2016.25.1.4

3. Vu, N. V. N., Santosa, S. P., **Gunawan, L.**, & Jusuf, A. (2016). The Influence of Forming Effects on The Bending Crush Behavior of Top-Hat Thin-Walled Beams. *MESIN*. 25(2)
4. **Gunawan, L.**, Dimas, A., Jusuf, A., Dirgantara, T., & Putra, I. S. (2016). Karakterisasi Sifat Mekanik Mild Steel St37 dan High Strength Steel CR420LA pada Laju Regangan Menengah. *MESIN*, 25(2). doi:10.5614/MESIN.2016.25.2.5

d. Publikasi Prosiding Seminar Internasional

1. Yaffie, F., Handoko, Y. A., **Gunawan, L.**, Putra, E. D. J. (2023). Influence of Carbody Flexibility on Vertical Vibration Level of Rail Vehicle. *The 9th International Conference on Science and Technology (ICST UGM 2023)*, Yogyakarta.
2. **Gunawan, L.**, Hakim, R., Wicaksono, S., Jusuf, A., Dirgantara, T., Pulungan, A. A. (2023). Numerical Simulation of Aluminum Plate Damage Subjected to Hydrodynamic Impact. *The 21st International Conference on Fracture and Damage Mechanics (FDM 2023)*. London.
3. Untarsa, Y., Izzuddin, M. A., Akbar, M., Kusni, M., **Gunawan, L.** & Sasongko, R.A. (2022). Sensitivity Analysis on Aeroelastic Characteristic of Jet Fighter Aircraft Wing. *The 3rd ITB Graduate School Conference (IGSC)*, Bandung.
4. Kevin, A., Aulia, D. K., Agung, R., Akbar, M., Rawikara, S. S., Widagdo, D., **Gunawan, L.** & Sasongko, R.A. (2022). Analysis of Piezoelectric Structure via Finite Element Method with Thermal Analogy. *The 3rd ITB Graduate School Conference (IGSC)*, Bandung.
5. Agung, R., Kevin, A., Akbar, M., **Gunawan, L.**, Sasongko, R.A. & Kusni, M. (2021). Time Reversal Method for Linear Hysteretic Damping on Multi-degree of freedom Structure. *The 3rd ITB Graduate School Conference (IGSC)*, Bandung.
6. Izzuddin, M.A., Putri, M.H., Kusni, M., **Gunawan, L.**, Sasongko, R.A., & Akbar, M. (2021). Flutter analysis of jet fighter aircraft anisogrid composite wing structure. In: Ferreira, A.J.M., Marques, F. D. (Eds), *Book of Abstracts: Online Symposium on Aeroelasticity, Fluid-Structure Interaction, and Vibrations*. Porto: University of Porto, 108-113.
7. Ramadhani, M.J., **Gunawan, L.**, Moelyadi, M.A., Kusni, M., Sasongko, R.A. & Akbar, M. (2021). On the aeroelastic study of a multi boom tandem wing HALE UAV configuration. In: Ferreira, A.J.M., Marques, F. D. (Eds), *Book*

- of Abstracts: Online Symposium on Aeroelasticity, Fluid-Structure Interaction, and Vibrations*. Porto: University of Porto, 99-104.
8. Furqon, A., Agung, R., Akbar, M., **Gunawan, L.**, Sasongko, R.A. & Kusni, M. (2021). Investigation on the vibration of high-rise building with tuned mass damper system exerted by wind loading. In: Ferreira, A.J.M., Marques, F. D. (Eds), *Book of Abstracts: Online Symposium on Aeroelasticity, Fluid-Structure Interaction, and Vibrations*. Porto: University of Porto, 93-98.
 9. Wahyanto, W., Izzuddin, M.A., **Gunawan, L.**, Kusni, M., Akbar, M. & Sasongko, R.A. (2021). Modelling and aeroelastic analysis on composite wing of tactical unmanned aerial vehicles (TUAV). In: Ferreira, A.J.M., Marques, F. D. (Eds), *Book of Abstracts: Online Symposium on Aeroelasticity, Fluid-Structure Interaction, and Vibrations*. Porto: University of Porto, 87-92.
 10. Syahputra, A.D., **Gunawan, L.**, Sasongko, R.A. & Akbar, M. (2021). Flutter derivatives identification of long-span bridges wind tunnel test models using free vibration technique. In: Ferreira, A.J.M., Marques, F. D. (Eds), *Book of Abstracts: Online Symposium on Aeroelasticity, Fluid-Structure Interaction, and Vibrations*. Porto: University of Porto, 65-67.
 11. Akbar, M., **Gunawan, L.**, Sasongko, R.A., Kusni, M. & Ramadhani, M.J. (2021). Evaluation of piezoelectric energy harvesting for aeroelastic wind tunnel test model. In: 24th International Conference on Composite Structures, Porto, Portugal, 2021.
 12. Andria, N., Zuhail, L. R., **Gunawan, L.**, & Muhammad, H. (2020). A 2D corotational formulation for dynamic analysis of flexible beams undergoing extremely large deformation. *AIP Conference Proceeding*, 2226, Article 040002. doi:10.1063/5.0005361
 13. Kusni, M., Taufiqurrahman, A., & **Gunawan, L.** (2020). V-Tail flutter analysis of wing-in-surface-effect (WISE) aircraft using a structural analysis software. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1173, Article 12060. doi: 10.1088/1757-899X/1173/1/012060
 14. Kurniati, E.O., Dirgantara, T., **Gunawan, L.**, & Jusuf, A. (2020). Meso-modeling of Closed-Cell Aluminum Foam Under Compression Loading. In: Praveen Kumar, A., Dirgantara, T., Krishna, P.V. (eds) *Advances in Lightweight Materials and Structures*. Springer Proceedings in Materials, vol 8. Springer, Singapore. doi:10.1007/978-981-15-7827-4_1
 15. Jusuf, A., Gunawan, L., Dirgantara, T., Mubarhak, F. (2020). Numerical Analysis of Double-Hat Multi-Corner Column Under Axial Loading. In: Praveen Kumar, A., Dirgantara, T., Krishna, P.V. (eds) *Advances in*

- Lightweight Materials and Structures. Springer Proceedings in Materials*, vol 8. Springer, Singapore. doi:10.1007/978-981-15-7827-4_3
16. Kusni, M., Purnomo, **Gunawan, L.**, Akil, H.A. (2020). Design of Active Noise Reduction Equipment Using Multipole Secondary Source. In: Praveen Kumar, A., Dirgantara, T., Krishna, P.V. (eds) *Advances in Lightweight Materials and Structures . Springer Proceedings in Materials*, vol 8. Springer, Singapore. doi:10.1007/978-981-15-7827-4_2
 17. Masli, R., Budiwantoro, B., Santosa, S.P., & Gunawan, L. (2019). Rectangular Crash Boxes Implementation on Impact Energy Absorbing System for Lightweight Rail Vehicle Application. *2019 6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*, 225-230. doi:10.1109/ICEVT48285.2019.8994004
 18. Jusuf, A., Dirgantara, T., **Gunawan. L.**, Santosa, S. P., & Putra, I.S. (2017). Corner Modelling Strategy for Finite Element Impact Simulation of Extruded Square Thin-Walled Column. *Procedia Engineering*, 173, 1307-1313. doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.167
 19. Prabowo, D. A., Kariem, M. A., & **Gunawan, L.** (2017). The Effect of Specimen Dimension on the Results of the Split Hopkinson Tension Bar Testing. *Procedia Engineering*, 173, 608-614. doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.114
 20. Kariem, M. A., Setiawan, R., Agustianto, W., & **Gunawan, L.** (2017). On the Development of Horizontal Impact Test System (HITS): Estimation of Impact Loads and Deceleration. *Procedia Engineering*, 173, 1479-1468. doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.224
 21. Afdhal, Jusuf, A., **Gunawan, L.**, Santosa, S. P., Dirgantara, T., & Putra, I. S. (2017), Numerical Simulation of SHPB to Measure the Mechanical Properties of Aluminium Foam Material at High Strain Rate by Using MAT 163 Modified Crushable Foam. *AIP Conference Proceedings*, 1831, Article 0200057. doi:10.1063/1.4981198
 22. Tran, H., **Gunawan, L.**, Santosa, S. P., Jusuf, A., & Putra, I. S. (2014). High Velocity Impact Loading on Thin-walled Column. *Proceedings The 7th AUN/SEED-Net Regional Conference in Mechanical and Manufacturing Engineering*, Vietnam, 422-427
 23. Jusuf, A., Kurniati, E. O., Dirgantara, T., & **Gunawan, L.** (2014). Effect of Strain Rate Consideration of Aluminium Foam to the Crash Behavior of Square Foam-Filled Column Structures, *10th International Conference on Fracture & Strength of Solids*, Tokyo

VII. PENGHARGAAN

- Penghargaan Dies ITB dalam bidang Pengembangan Institusi, Rektor ITB, 2017
- Penghargaan Pengabdian 25 Tahun ITB, Rektor ITB, 2016
- Satya Lancana Karya Satya XX Tahun, Presiden Republik Indonesia, 2016
- Satya Lancana Karya Satya X Tahun, Presiden Republik Indonesia, 2003

VIII. SERTIFIKASI

- Sertifikat Insinyur Profesional Madya, Pengurus Pusat PII, 2016
- Sertifikat Pendidik, Departemen Pendidikan Nasional, 2009



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id [FgbItb](#) [FGB_ITB](#)
📱 [@fgbitb_1920](#) [Forum Guru Besar ITB](#)

ISBN 978-623-297-416-6

