

Analisis Kelaiktabrakan Dari Struktur Kolom Yang Diisi Dengan *Foam* Dan Tanpa *Foam* Terhadap Beban Pada Subfloor Helikopter

Azzahra Difa Rasyidah^[1], Sahril Afandi Sitompul^[2], Amat Chaeroni^[3]

^{[1][2][3]}Prodi Teknik Penerbangan, Fakultas Teknologi Kedirgantaraan,
Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma

Komplek Bandara Halim Perdanakusuma, Jakarta, 13610, Indonesia

*Corresponding Author: difarasyidah10@gmail.com

ABSTRAK - Kelaiktabrakan (*crashworthiness*) merupakan suatu kemampuan dari struktur kendaraan untuk berdeformasi dengan gaya yang terkontrol dan memberikan ruang yang cukup untuk penumpang sehingga membatasi kemungkinan cedera selama peristiwa tabrakan terjadi. Lalu lintas penerbangan di Indonesia mengalami tren peningkatan dari tahun ke tahun. Peningkatan frekuensi penggunaan pesawat terbang tentunya akan meningkatkan kemungkinan kejadian kecelakaan. Konsep kelaiktabrakan pesawat terbang menjadi hal penting yang perlu mendapat perhatian untuk mencegah kerusakan struktur dan cedera pada penumpang. Desain kelaiktabrakan struktur pesawat berada pada tahapan desain awal yang terintegrasi kedalam proses desain pesawat secara keseluruhan menggunakan simulasi *Abaqus CAE*. Struktur subfloor pada pesawat terbang menjadi bagian yang digunakan untuk menyerap energi kinetik tabrakan dalam kasus pembebanan vertikal pada pesawat terbang. *Crash box* merupakan komponen pada subfloor yang akan menyerap energi kinetik tabrakan dengan mengubahnya menjadi deformasi plastis. Dimana bentuk *octagonal* dengan kecepatan 15 m/s memiliki nilai P_{max} paling tinggi yaitu 12223.8 kN. Mendapatkan nilai crushing force efficiency (CFE) terbesar dari model *Crashbox Square* dengan variasi kecepatan 5m/s yaitu bernilai 0.91 dan model *Crashbox octagonal* dengan variasi kecepatan 5m/s bernilai 0.85.

Kata kunci : Pesawat Terbang, Kelaiktabrakan, *Subfloor*, *Crash Box* , *Abaqus CAE*.

ABSTRACT - Crashworthiness is the ability of the vehicle structure to deform with a controlled force and provide sufficient space for passengers thereby limiting the possibility of injury during a collision. Air traffic in Indonesia is experiencing a positive trend in recent years. The increase in the frequency of aircraft operation might particularly increase the possibility of accidents occurrence. Aircraft crashworthiness concept becomes an important matter that need to be considered in order to prevent structural damage and injuries to the passengers. Aircraft structural crashworthiness design is developed in the aircraft preliminary design phase which is, later, integrated into the overall aircraft design process. Aircraft subfloor structure is the part of the aircraft that is used to restrain the kinetic energy of a collision in the case of vertical loading on the aircraft. Subsequently, crash box is a component of the subfloor that will absorb collisions kinetic energy by turning it into plastic deformation. Where the *octagonal* shape with a speed of 15 m/s has the highest P_{max} value of 12223.8 kN. Obtaining the largest crushing force efficiency (CFE) value from the *Crashbox Square* model with a speed variation of 5m/s is worth 0.911 and the *Octagonal Crashbox* model with a speed variation of 5m/s is worth 0.852.

Keywords: Aircraft, Crashworthiness, Subfloor, Crash Box, Abaqus CAE

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penerbangan adalah satu kesatuan sistem yang terdiri atas pemanfaatan wilayah udara, pesawat udara, bandar udara, angkutan udara, navigasi penerbangan, keselamatan dan keamanan, lingkungan hidup, serta fasilitas penunjang dan fasilitas umum lainnya. Kegiatan penerbangan memiliki kaitan yang erat dengan kebutuhan mobilitas manusia di suatu negara. Di Indonesia, penerbangan memiliki tujuan langsung dengan usaha memperlancar pertumbuhan ekonomi, menunjang, menggerakkan, dan mendorong pencapaian tujuan pembangunan nasional. Secara lebih spesifik, pesawat terbang sebagai salah satu jenis pesawat udara yang menjadi bagian dari suatu sistem penerbangan yang memiliki karakteristik sebagai pesawat udara yang lebih berat dari udara, bersayap tetap, dan dapat terbang dengan mesin sendiri.^[1]

Penelitian *crash box* dengan variasi *cross section* telah dilakukan dimana semakin banyak *ribs* semakin besar energi yang dapat diserap oleh *crash box*.^[4] Desain *crash box* tersebut cocok untuk diaplikasikan pada wahana yang dapat mengalami beban *impact* yang besar. Selain itu pada penelitian lain penambahan *aluminium foam* kedalam struktur *crash box* dapat juga meningkatkan kemampuan *crash box* dalam menyerap energi tumbukan. Dalam penelitian ini dilakukan analisis mengenai *crash box* dengan variasi *cross section*. *Crash box* ini didesain untuk dapat menahan beban *impact* pada helikopter ketika jatuh secara vertikal. Hasil *cross section* yang terbaik akan ditambahkan *foam* untuk mengetahui peningkatan performa kelaiktabrakan pada *crash box*.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis performa kelaiktabrakan *crashbox* terhadap variasi geometri penampang *square* dan *octagonal*.
2. Mengetahui respon dinamik dengan perbedaan *cross section square* dan *octagonal* dengan variasi kecepatan.
3. Mengetahui efek penambahan aluminium *foam* pada *crashbox* terhadap performa kelaiktabrakan

II. LANDASAN TEORI

2.1 Kelaiktabrakan

Kelaiktabrakan (*crashworthiness*) merupakan suatu kemampuan dari struktur kendaraan untuk berdeformasi dengan gaya yang terkontrol dan memberikan ruang yang cukup untuk penumpang sehingga membatasi kemungkinan cedera selama peristiwa tabrakan terjadi. Pengontrolan gaya dapat dilakukan dengan membatasi perlambatan (*deceleration*) dengan jarak yang tersedia selama terjadi peristiwa tabrakan.^[1]

Tujuan dari suatu konsep desain laik tabrak adalah:^[2]

1. Menghilangkan peluang cedera atau korban jiwa pada kejadian tabrakan ringan.
2. Meminimalisir cedera dan korban jiwa pada kejadian tabrakan berat.
3. Meminimalisir kerusakan pada struktur pesawat terbang pada semua kejadian tabrakan.

2.2 Regulasi kelaiktabrakan

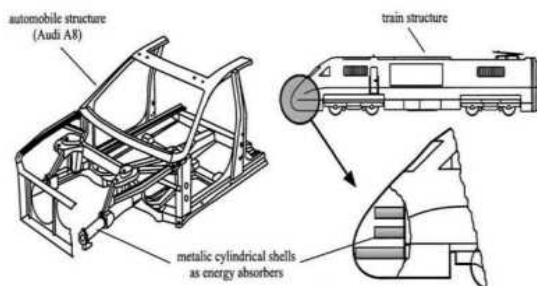
Regulasi mengenai desain struktur laik tabrak untuk pesawat terbang kecil (*small airplane*) terdapat pada FAR Bagian 23 tentang "Persyaratan Umum" dan mengenai "Kondisi Dinamik Mendarat Darurat".

Regulasi tersebut menyatakan bahwa dalam keadaan mendarat

darurat sebuah pesawat terbang diizinkan untuk mengalami kerusakan, namun struktur harus didesain sedemikian rupa sehingga dapat menyerap energi tabrakan, sehingga penumpang tidak mengalami cedera yang serius pada saat terjadi kecelakaan. Di dalam regulasi juga disebutkan bahwa struktur kursi penumpang tidak diperbolehkan untuk terlepas dari lantai ketika menerima beban tabrakan vertikal.^[1]

2.3 Crash box

Crash box merupakan komponen struktur yang dipasang pada sistem *subfloor* pesawat terbang yang berfungsi untuk menyerap energi kinetik tabrakan dari pesawat terbang melalui deformasi. Komponen ini sangat banyak dikembangkan dan telah diaplikasikan pada berbagai jenis kendaraan seperti mobil, kereta api, pesawat terbang, dan helikopter seperti pada Gambar 2.1. *Crash box* telah menjadi bagian dalam strategi pengembangan struktur laik tabrak saat ini.^[1]



Gambar 2. 1 Penggunaan Crash Box pada Mobil dan Kereta

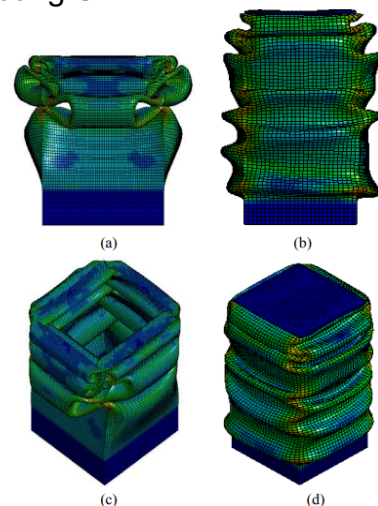
2.4 Regangan dan Tegangan

Regangan merupakan perubahan ukuran atau bentuk dari panjang awal sebagai hasil dari gaya yang menarik atau menekan pada suatu material. Regangan dibagi menjadi 2 jenis regangan yaitu, *true strain* dan *nominal strain*. Tegangan merupakan tahanan material terhadap gaya atau beban. Tegangan normal dapat berupa tarik dan tekan. Terdapat

2 jenis tegangan yaitu, *true stress* dan *nominal stress*.

2.5 Modus deformasi plastis

Modus deformasi plastis yang terjadi pada tabung segi empat berdinding tipis (SW) dan tabung segi empat yang diisi dengan aluminum *foam* (SW-FF) ditunjukkan pada Gambar 2.6. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kedua tabung mengalami *progressive buckling* dengan modus deformasi inextensional, dimana dua sisi tabung yang saling terkoneksi memiliki lipatan yang berlawanan arah yaitu satu sisi melipat keluar dan satu sisi melipat kedalam. Dari hasil pemodelan didapatkan pula bahwa pada kondisi pembebanan yang sama kedua tabung memiliki jumlah lipatan yang berbeda, dimana lipatan pada tabung SW-FF lebih banyak (*half wave*, 2H yang lebih pendek) dibandingkan dengan lipatan pada tabung SW.^[3]



Gambar 2. 2 Modus deformasi plastis (a) (c) tabung segi empat berdinding tipis (SW), (b) (d) tabung segi empat yang diisi dengan aluminum *foam* (SW-FF).

2.6 Parameter performa crash box

Dalam mengukur uji tabrak terdapat beberapa parameter untuk menilai bagaimana karakter *crashbox* yang bagus:

1. *Energy absorption* adalah energi yang diserap oleh struktur untuk terdeformasi selama mengalami *impact*. Total energi yang diserap oleh struktur setara dengan daerah dalam kurva *instantaneous force vs displacement* yang dirumuskan dalam:[4]

$$EA = \int_0^{d_{max}} F dS$$

2. *Mean crushing force* adalah nilai rata-rata gaya yang dialami oleh struktur selama terdeformasi. MCF optimal terjadi bila nilai cenderung sama dengan nilai P_{max} (nilai force tertinggi). MCF dapat dirumuskan dalam:[4]

$$MCF = \frac{EA}{d}$$

3. *Spesific Energy Absorption (SEA)*

Yang dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$SEA = \frac{EA}{m}$$

Dimana m adalah massa tabung yang telah terdeformasi.[3]

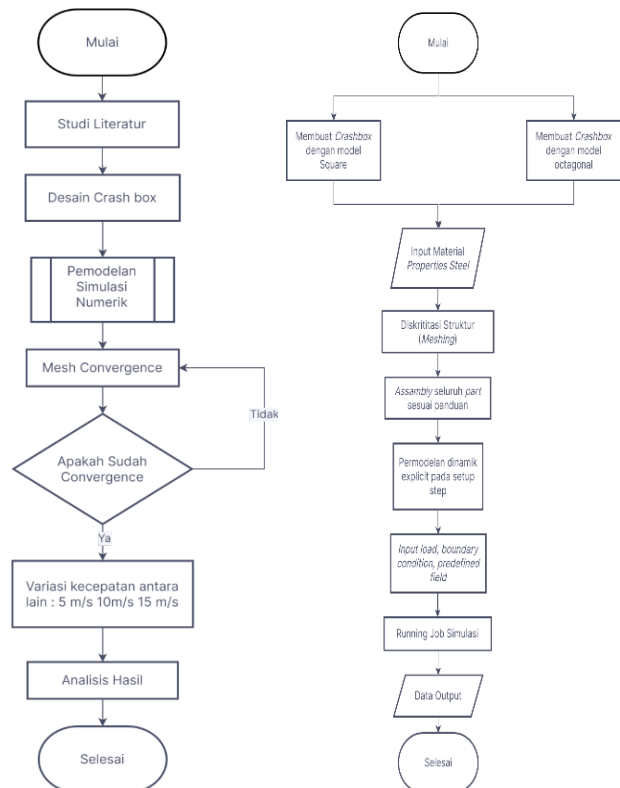
2.7 Metode elemen hingga

Metode elemen hingga merupakan suatu *analytical tool* untuk memprediksikan respon dari suatu sistem *engineering*. Kemampuan metode elemen hingga untuk dalam menyelesaikan permasalahan pada struktur geometri yang kompleks dilakukan dari pendekatan pertama yaitu mendiskritisasi struktur menjadi satu elemen-elemen kecil berhingga.[5] Dalam metode elemen hingga persamaan dari seluruh sistem dibentuk dari penggabungan persamaan elemen-elemen. Maka untuk penyelesaian masalah struktur yang didapat adalah deformasi pada setiap titik (*nodes*) yang selanjutnya digunakan untuk mendapatkan besaran-besaran tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

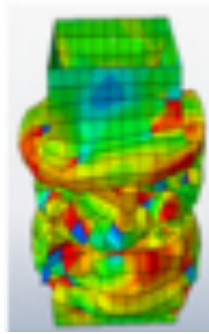
Analisis kelaiktabrakan dari struktur kolom yang diisi dengan *foam* dan tanpa *foam* terhadap beban pada helikopter, dilakukan dengan tahapan seperti yang tercantum pada Gambar 3.1



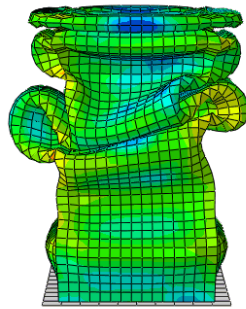
Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian dan Simulasi

3.2 Hasil Verifikasi Pemodelan

Verifikasi pemodelan simulasi numerik bertujuan untuk mengetahui bagaimana hasil dari proses simulasi *software Abaqus CAE* dengan hasil jurnal. Pada Gambar 4.1 menampilkan perbandingan hasil antara simulasi jurnal Tarlochan, Samer, Hamouda, Ramesh, dan Karam (2013) dengan simulasi yang dilakukan peneliti. Pada Gambar menampilkan hasil variabel antara jurnal dengan simulasi peneliti.



(a)

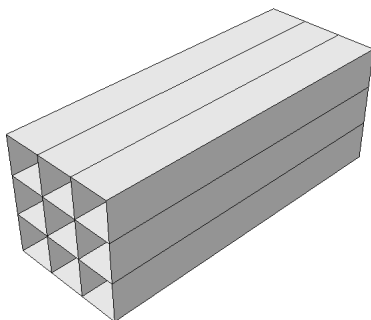
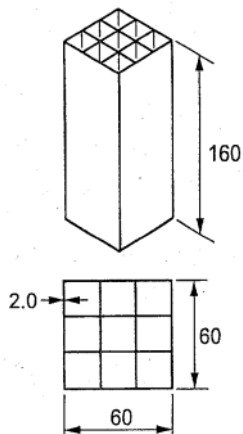


(b)

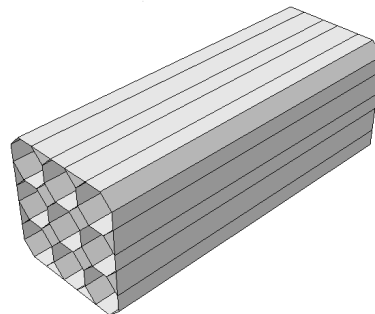
Gambar 3. 2 (a) Hasil simulasi Jurnal
(b) Hasil Simulasi Peneliti

3.3 Pemodelan struktur *Crashbox* simulasi

Pemodelan dilakukan di dalam *software* ABAQUS CAE 2017, dimulai dari membuat *part* demi *part* kemudian dilanjutkan dengan *assembly*. Sehingga model yang dirancang akan seperti gambar.

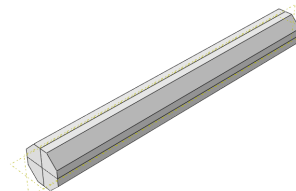


(a)

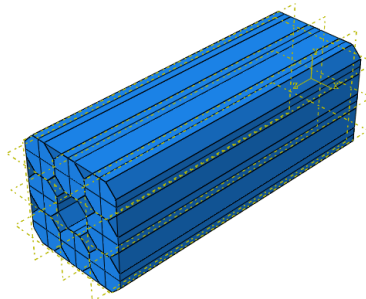


(b)

Gambar 3.3 Konfigurasi Struktur kolom berbanding tipis: (a) 9 square tubes; (b) 9 octagonal tubes.

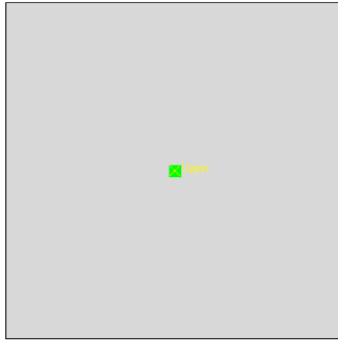


(a)



(b)

Gambar 3.4 (a) *part* aluminum foam
(b) *assembly* part aluminum foam dengan *part* *crashbox*



Gambar 3.5 part plate

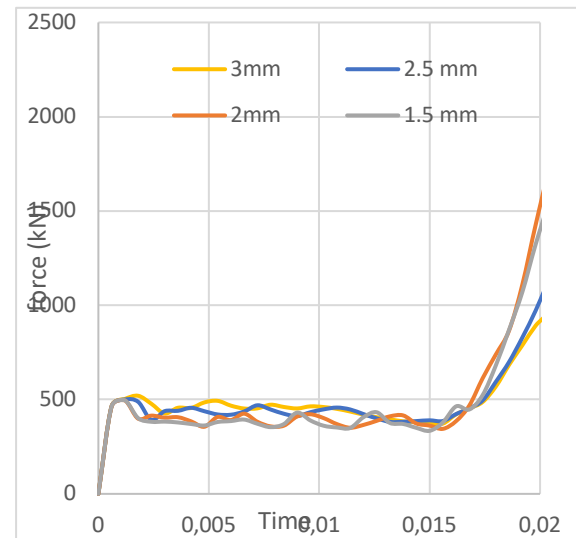
Plate adalah material pelat berbentuk segiempat berfungsi sebagai tumpuan beban tumbukan dan *crash box*. Material yang digunakan untuk membuat pemodelan *upper & lower plate* adalah material tipe *shell plannar*. Material tipe *shell plannar* pada aplikasi *abaqus* dibuat *discrate rigid*. *Upper plate* berada di sisi atas berfungsi sebagai *impactor plate*, sedangkan *lower plate* berada di sisi bawah berfungsi sebagai tumpuan *crash box* yang tidak bergerak.

3.4 Meshing dan mesh konvergensi

Pemilihan tipe elemen yang digunakan pada model *crashbox* adalah tipe elemen *shell S4R*. Empat ukuran *mesh* dipilih (3, 2.5, 2, 1.5)mm untuk simulasi. *Mesh* ini disimulasikan untuk mendapatkan titik konvergen dari ukuran *mesh* model yang disimulasikan. *Mesh* yang digunakan dalam simulasi adalah tipe *quad*. Hasil grafik mulai konvergen pada *mesh* 2, sehingga *mesh* 2 dipilih untuk digunakan pada penelitian ini. Dapat dilihat di Gambar 3.6.

3.5 Data material

Material yang digunakan untuk simulasi kali ini adalah material *MidSteel* dengan ketebalan 2 mm dan *alumunium foam* untuk model struktur *Crash-Box*.



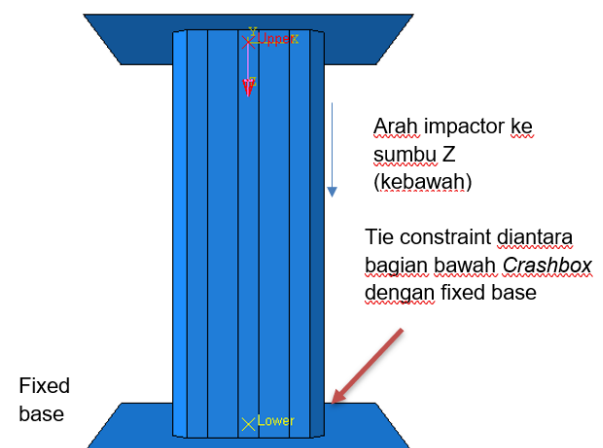
Gambar 3.6 grafik force vs time

3.6 Pendefinisian jenis analisis

Jenis analisis yang digunakan yakni Analisis dinamik, Jenis yang digunakan pada simulasi penelitian *dynamic explicit*, dengan waktu simulasi 0.03 dan jumlah interval adalah 100. Nilai Time Period didapat dari hasil panjang *crashbox* dibagi dengan kecepatan yang di input.

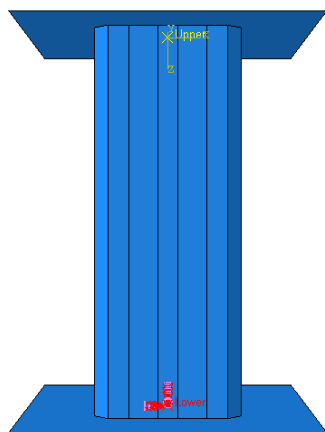
3.7. Kondisi pembebanan dan kondisi batas

Kondisi pembebanan dimaksudkan sebagai proses interaksi yang terjadi dari proses tumbukan yang terjadi pada *crashbox*, yang masing-masing telah dimasukkan nilai gaya *stress*, *strain*, dan nilai elastis-plastisnya. Setup beban dalam Analisa dinamik.



Gambar 3.7 Arah impactor

Kondisi batas menjelaskan batasan-batasan yang ditentukan pada *crashbox* terhadap beban *Impactor*. Menentukan batas kondisi letak BC (*boundary Condition*) dengan memilih *Encastre* lalu, menandakan bagian tumpuan pada bagian *lowerplate* bertujuan untuk menentukan letak *fix* tumpuan material struktur yang menahan deformasi tumpuan tumbukan oleh beban *impact* pada *impactor*. Proses ini juga adalah menentukan komponen yang tetap tak bergerak.



Gambar 3.8 BC pada lower plate

3.8. Setup Interaction

Tie constraint digunakan untuk mengikat *crash box* dengan *lower plate*. *Lower plate* digunakan sebagai *master surface* dan *crash box* sebagai *slave surface*. *Lower plate* dipilih sebagai *master surface* karena *lower plate* adalah tumpuan *crash box* selama proses uji tumbukan.

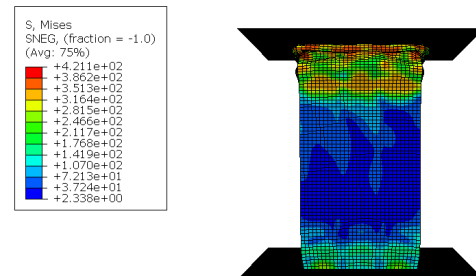
3.9. Output Simulasi

Hasil *output* dari simulasi ini yakni: UT=Displacement (mm) RF=force (N)

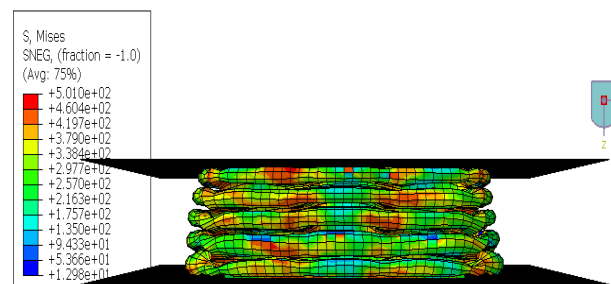
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Analisis Numerik dari *Crash Box Model Square* dengan Variasi Kecepatan Tanpa *Foam*

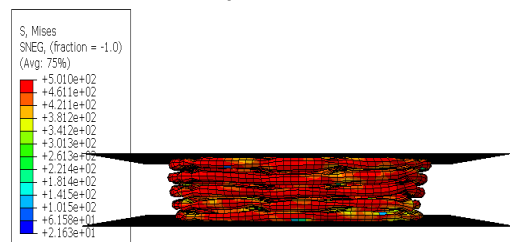
Pada hasil simulasi dari *tube 9 Square* menggunakan *MildSteel* dengan kecepatan sebesar 5 m/s, 10 m/s, dan 15 m/s. Massa yang diberikan terhadap *crash box* sebesar 1.34 ton oleh *impactor plate*. Berikut hasil dari *crashbox* yang terdeformasi:



Gambar 4.1 Hasil tumbukan dari kecepatan 5 m/s

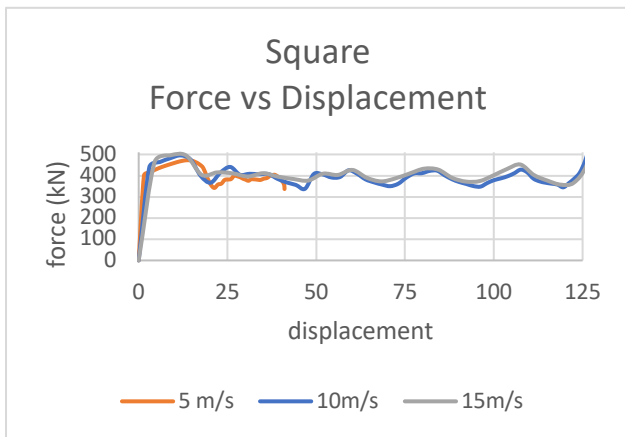


Gambar 4.2 Hasil tumbukan dari kecepatan 10 m/s



Gambar 4.3 Hasil tumbukan dari kecepatan 15 m/s

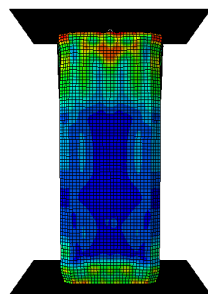
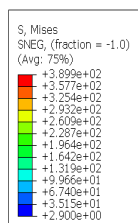
Pada Gambar 4.4 menunjukkan nilai P_{max} yang berbeda beda dengan hasil yang didapatkan dari *force vs displacement*. Pada variasi kecepatan 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s memiliki nilai P_{max} sebesar 472.67 kN, 2033.03 kN, dan 2824.98 kN. Pada kecepatan 5 m/s energi dapat terserap sepenuhnya oleh *crashbox*, sedangkan pada kecepatan 10 m/s dan 15 m/s belum sepenuhnya terserap oleh *crashbox*.



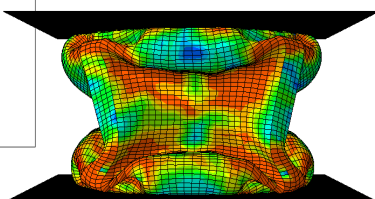
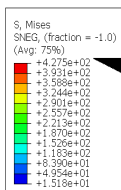
Gambar 4. 4 Grafik Hasil *Crashbox Square*

4.2 Hasil Analisis Numerik Dari Crash Box model Octagonal dengan Variasi Kecepatan Tanpa *Foam*

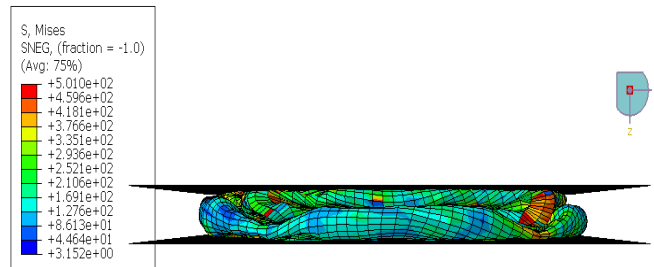
Berikut hasil simulasi dari *tube 9 octagonal* menggunakan material *MildSteel* dengan kecepatan sebesar 5 m/s, 10 m/s, dan 15 m/s. Massa yang diberikan terhadap *crash box* sebesar 1.34 ton oleh *impactor plate*. Berikut hasil *visual* dari *crashbox* yang terdeformasi:



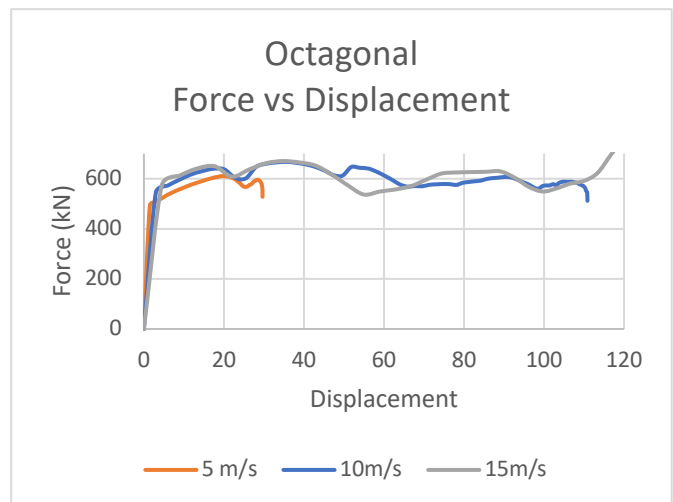
Gambar 4.5 Hasil tumbukan dari kecepatan 5 m/s



Gambar 4.6 Hasil tumbukan dari kecepatan 10 m/s



Gambar 4.7 Hasil tumbukan dari kecepatan 15 m/s



Gambar 4. 8 Grafik Hasil *Crashbox Octagonal*

Pada Gambar 4.8 menunjukkan nilai P_{max} yang berbeda beda dengan hasil yang didapatkan dari *force vs displacement*. Pada variasi kecepatan 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s memiliki nilai P_{max} sebesar 610.42 kN, 667.34 kN, dan 670.49 kN. Pada kecepatan 5 m/s dan 10 m/s energi dapat terserap sepenuhnya oleh *crashbox*, sedangkan pada kecepatan 15 m/s belum sepenuhnya terserap oleh *crashbox*.

4.3 Hasil Numerik *Crash Box Tanpa Foam*

Pada sub bab ini akan membandingkan hasil pada setiap kecepatan yang telah dianalisis untuk mencari perbedaan perbedaan yang signifikan.

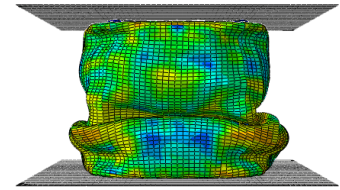
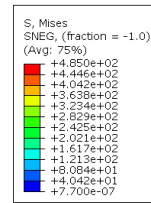
Tabel 4. 1 Hasil perhitungan model dengan variasi kecepatan

parameter	Square			Octagonal		
	5 m/s	10 m/s	15 m/s	5 m/s	10 m/s	15 m/s
EA (kJ)	16.54	47.07	49.22	16.49	66.35	67.45
MCF (kN)	402.75	393.7	401.82	556.16	598.56	594.97
SEA (kJ/kg)	53.25	52.06	53.13	59.72	64.27	63.89

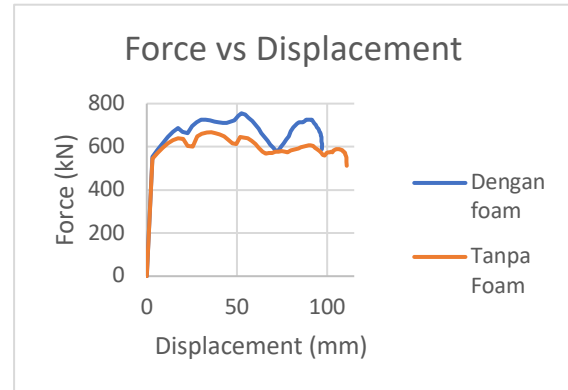
Berdasarkan nilai dari MCF dan EA *tube* octagonal lebih besar dibandingkan dengan *tube* square. Kemudian untuk nilai SEA dengan kecepatan 10 m/s *tube* octagonal lebih besar dibandingkan dengan *tube* square dengan kecepatan yang sama. Berdasarkan Tabel 4.1 menunjukkan nilai parameter *tube* octagonal lebih baik dibandingkan dengan *tube* square. *Tube* octagonal dilakukan penambahan material *foam* untuk meningkatkan performa kelaiktabrakan. Hasil parameter *tube* octagonal dengan *foam* kemudian dibandingkan dengan *tube* octagonal tanpa *foam* untuk mengetahui pengaruh dari penambahan material *foam* terhadap parameter. Parameter yang digunakan sebagai pembanding adalah MCF dan SEA.

4.4 Hasil Analisis Crash Box dengan Material Aluminium Foam

Berdasarkan hasil simulasi tanpa *foam*, *tube* octagonal memiliki nilai CFE yang lebih baik dibandingkan dengan *tube* square. Sehingga, *tube* octagonal dipilih untuk dilakukan simulasi dengan penambahan material *foam* yang diberi kecepatan sebesar 10 m/s. Kecepatan ditentukan oleh besarnya nilai MCF dan SEA. Massa yang diberikan terhadap *crash box* sebesar 1.34 ton oleh *impactor plate*. Pada sub bab ini akan membahas hasil simulasi *tube* octagonal dengan *foam*, berikut hasil dari *crashbox* yang terdeformasi :



Gambar 4.9 Hasil Simulasi Crashbox dengan foam



Gambar 4. 10 Grafik Force Vs Displacement Pada *Tube* Octagonal Dengan Material *Foam* dan tanpa *foam*

Pada Gambar 4.10 menunjukkan *tube* yang memakai *foam* memiliki nilai P_{max} sebesar 755.13 kN. Sedangkan, *tube* yang tidak memakai *foam* memiliki nilai P_{max} 667.34 kN. Pada *tube* dengan *foam* dan tanpa *foam* energi dapat terserap oleh *crashbox* sepenuhnya.

4.5 Hasil Numerik Crash Box dengan Foam

Pada sub bab ini akan membandingkan hasil pada setiap kecepatan yang telah dianalisis untuk mencari perbedaan perbedaan yang signifikan.

Berdasarkan Tabel 4.2 *Tube* octagonal dengan *foam* memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan dengan nilai parameter *tube* octagonal tanpa *foam*. Penambahan material *foam* ke dalam *crash box* membuat peningkatan performa pada penyerapan energi sehingga meningkatkan performa kelaiktabrakan.

Tabel 4. 2 Hasil Perhitungan Dengan Perbandingan Material

parameter	<i>Octagonal</i> tanpa <i>foam</i>	Octagonal dengan <i>foam</i>
EA (kJ)	66.35	66.93
MCF (kN)	598.56	689.51
SEA (kJ/kg)	64.27	68.95

V. PENUTUP

5. 1 Kesimpulan

Pada tugas akhir ini telah dilakukan uji simulasi numerik untuk menilai seberapa besar efek penggunaan bentuk model dan kecepatan yang berbeda pada *crash box*. Berdasarkan hasil yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Pada model *square* dengan variasi kecepatan 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s memiliki nilai MCF sebesar 402.75 kN, 393.7 kN, dan 401.82 kN. Pada model *octagonal* dengan variasi kecepatan 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s memiliki nilai MCF sebesar 556.16 kN, 598.56 kN, dan 594.97 kN. Berdasarkan dari hasil nilai MCF, *tube octagonal* memiliki respon dinamik paling baik.
2. Pada setiap model *square* dengan variasi kecepatan 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s memiliki nilai SEA sebesar 53.25 kJ/kg, 52.06 kJ/kg, dan 53.13 kJ/kg. Pada model *octagonal* dengan variasi kecepatan 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s memiliki nilai SEA sebesar 59.72 kJ/kg, 64.27 kJ/kg, dan 63.89 kJ/kg. Berdasarkan dari hasil nilai SEA, *tube octagonal* pada kecepatan 10 m/s memiliki performa yang lebih baik dalam penyerapan *energy*.
3. Pada *tube octagonal* dengan *foam* dan tanpa *foam* memiliki nilai EA sebesar 66.93 kJ dan 66.35 kJ, memiliki nilai MCF sebesar 689.51

kN dan 598.56 kN, sehingga nilai SEA yang didapat sebesar 68.95 kJ/kg dan 64.27 kJ/kg. Berdasarkan dari hasil simulasi, *tube octagonal* yang ditambahkan dengan *foam* memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan *tube octagonal* tanpa *foam* sehingga memberikan peningkatan performa pada *crashbox*.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, maka untuk penelitian selanjutnya dapat melakukan hal hal sebagai berikut:

1. Melakukan perbandingan dengan beberapa material.
2. Melakukan perbandingan dengan arah kecepatan yang berbeda.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Jusuf, A. Afdhal, and M. Mora, 2017, Kajian Desain Kelaiktabrakan Pesawat Terbang. *Warta Ardhia*, vol. 42, no. 3, pp. 117–122
- [2] FAR Part 25.561, *Emergency landing conditions*.
- [3] A. Jusuf, S. Siahaan, T. Dirgantara, L. Gunawan, and I. S. Putra, 2012, Pengaruh Pengisian Aluminum Foam Terhadap Karakteristik Tumbukan Aksial Tabung Segi Empat, (*SNTTM XI*), pp. 16–17.
- [4] B. A. Warsiyanto, M. H. Widanto, I. Musthofa, and I. Maulana, 2021, The Effect of Cross-section and Elliptical Hole Ratio on Crashworthiness Parameters of Crash-Box Structure, *Teknologi Dirgantara*, vol. 19, no. 1, pp. 1–14.
- [5] FAA, 2018, *Aviation Maintenance Technician Handbook–Airframe (FAA-H-8083-31A)*, Volume 1. United States Department of Transportation, Oklahoma City.