



Analisis Struktur *Octet-Truss Lattice* Sebagai Struktur Penyerap Energi pada *Subfloor* Helikopter

I Ketut Adi Sentana Putra, Sigit Puji Santosa*, Tatacipta Dirgantara, Annisa Jusuf

Kelompok Keahlian Struktur Ringan
Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Indonesia
Jl. Ganesha 10, Bandung 40153, Indonesia
*Email: sigit.santosa@itb.ac.id

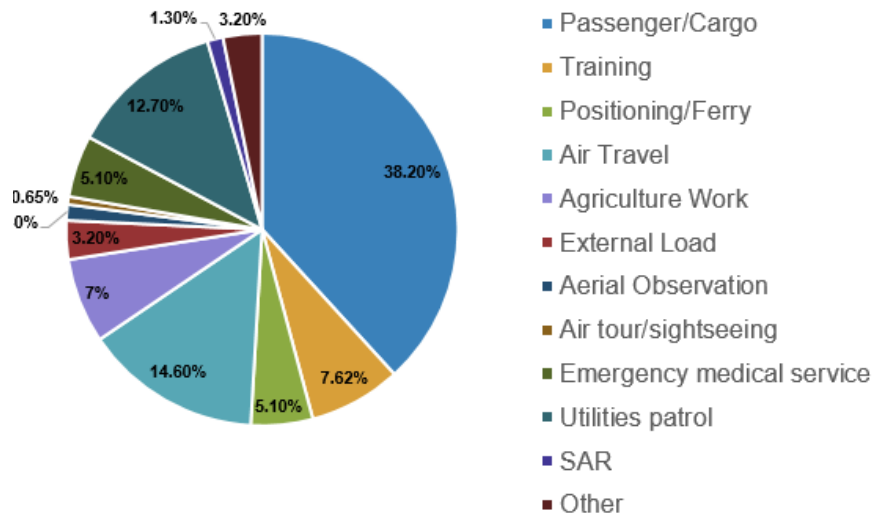
Abstrak. Semakin meningkatnya penggunaan helikopter dalam transportasi udara menyebabkan semakin meningkatnya peluang terjadinya kecelakaan. Sebagian besar kecelakaan pada helikopter adalah jatuh dan merusak bagian bawah struktur badan helikopter (*subfloor*) akibat beban dinamik [1]. Untuk meningkatkan keamanan perlu dilakukan kajian *crashworthiness* pada helikopter. Salah dengan mengoptimalkan struktur penyerap energi. Peningkatan energi serap dapat dilakukan dengan menggunakan geometri *lattice* sebagai struktur penyerap energi. Dilakukan studi perbandingan beberapa konfigurasi *lattice* dan didapatkan *octet-truss lattice* memiliki potensi yang baik untuk struktur penyerap energi tabrak. Pada pekerjaan ini difokuskan untuk melakukan studi mengenai karakteristik respon *octet-truss lattice* ketika dikenakan beban impact dan pengaplikasiannya pada struktur *subfloor* helikopter dengan metode elemen hingga. Analisis numerik dilakukan sebagai studi perbandingan efektivitas penyerapan energi dengan konfigurasi struktur *cruciform*, struktur *octet-truss lattice* bertumpuk uniform dan struktur *octet-truss lattice* bertumpuk *double taper*. Material yang digunakan dalam simulasi numerik berupa paduan aluminium AlSi-12. Setelah dilakukan simulasi numerik dengan metode elemen hingga akan dilihat struktur mana yang mempunyai *specific energy absorb* tertinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa struktur *lattice* dengan konfigurasi *double taper* memiliki *specific energy absorb* tertinggi sebesar 34.44 kJ/kg. Dari hasil pemodelan elemen hingga didapat konfigurasi *octet-truss lattice* dengan *double taper* memiliki potensi yang besar sebagai struktur penyerap energi dimasa depan

Kata Kunci: *lattice, specific energy absorbs, subfloor, densitas relatif, crashworthiness*

1 Pendahuluan

Helikopter merupakan alat transportasi udara yang fleksibel untuk berpindah tempat sebab helikopter tidak membutuhkan landasan udara yang panjang seperti pesawat bersayap tetap. Dengan kemampuan mengakses tempat yang sempit helikopter banyak diminati oleh pihak militer dan tim penyelamat, tetapi sekarang helikopter semakin diminati

sebagai alat transportasi perjalanan bisnis dan wisata dan alat bantu pertanian [1]. Dengan meningkatnya penggunaan helikopter meningkat pula jumlah kecelakaan yang terjadi.



Gambar 1 Persentase kecelakaan helikopter berdasarkan aktivitas dari tahun 2005-2015 [1]

Gambar 1 menunjukkan persentase kecelakaan helikopter untuk berbagai sektor penggunaan dari tahun 2005-2015. Kecelakaan helikopter terbanyak datang dari sektor helikopter penumpang/barang (38.2%) dan helikopter untuk wisata/air travel (14.6%). Dua jenis kecelakaan ini merupakan jenis yang rentan melibatkan penumpang sehingga diperlukan tingkat keamanan yang tinggi untuk melindungi penumpang sewaktu kecelakaan.

2 Parameter *Crashworthiness*

2.1 Total Energi Serap (*Energy absorption*)

Struktur *lattice* harus mampu menyerap energi kinetik tabrakan dan mendisipasi energi kinetik tabrak oleh *impactor* (penumbuk) menjadi deformasi plastis. Total dari energi yang diserap oleh struktur selama

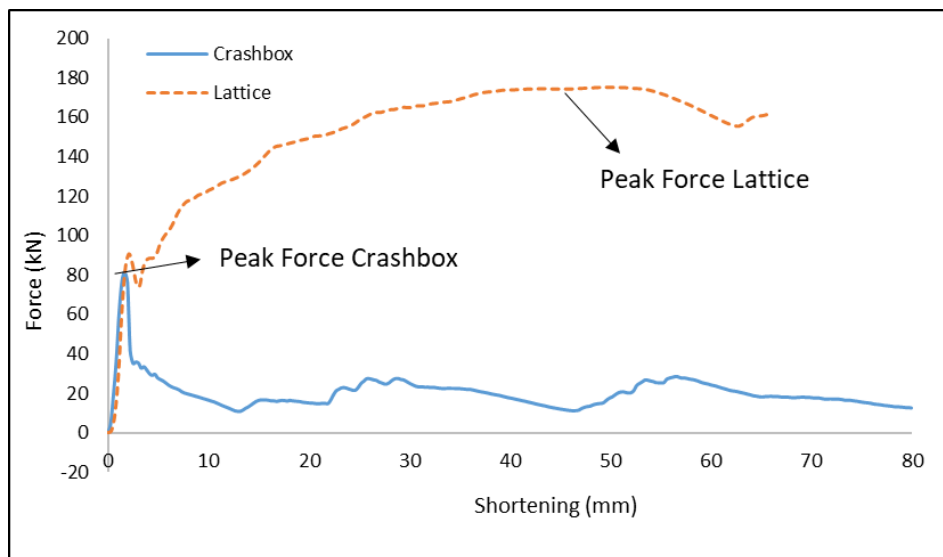
tumbukan dapat dicari dengan melakukan penjumlahan antara gaya yang bekerja dengan perpindahan atau deformasi yang terjadi pada struktur.

$$E_a = \int_0^{\delta_{max}} P(\delta) d\delta \quad (1)$$

P adalah gaya tumbukan arah aksial dan δ adalah deformasi pada arah aksial. E_a adalah energi yang diserap oleh struktur.

2.2 Peak force, P_{max}

Besarnya gaya aksial yang berubah-ubah muncul saat terjadi tumbukan diakibatkan adanya perilaku elastoplastis dari material. Pada *crashbox* konvensional ketika terbentuk lipatan pertama terjadi gaya yang paling besar yang dikenal sebagai *peak force*, gaya ini yang menginisiasi terjadinya lipatan selanjutnya dan proses penyerapan energi terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Kurva *force vs displacement* crashbox dan lattice

Dari hasil studi yang dilakukan terlihat perbedaan anatar respon *crashbox* konvensional dan respon *lattice* saat terjadi tumbukan tidak menunjukkan *peak force* yang tajam. Pada struktur *octet-truss lattice* memiliki *peak*

force yang cenderung lebih landai dan lebih panjang dibandingkan dengan *crashbox* konvensional, ini memungkinkan struktur *lattice* menyerap energi lebih besar.

2.3 Specific Energy Absorption (SEA)

Specific Energy Absorption (SEA) adalah energi yang diserap struktur berbanding dengan besar massa struktur.

$$SEA = \frac{E_a}{m} \quad (3)$$

E_a adalah total energi yang diserap oleh struktur dan m adalah massa struktur. SEA merupakan parameter yang sangat penting dalam kasus ini karena menunjukkan seberapa efektif performa suatu struktur dalam menyerap energi tabrak. SEA digunakan untuk membandingkan struktur yang memiliki parameter seperti bentuk penampang, tebal, dan massa yang berbeda.

2.4 Mean Crushing Force

Merupakan gaya rata-rata yang terjadi pada kasus impak. Mean crushing force merupakan gaya rata-rata yang dirasakan penumpang pada kasus impak. Mean crushing force dapat di cari dengan rumus matematika sebagai berikut:

$$Pm = \frac{1}{\delta} \int P(\delta) d\delta \quad (4)$$

Pm : mean crushing force

δ : perpindahan

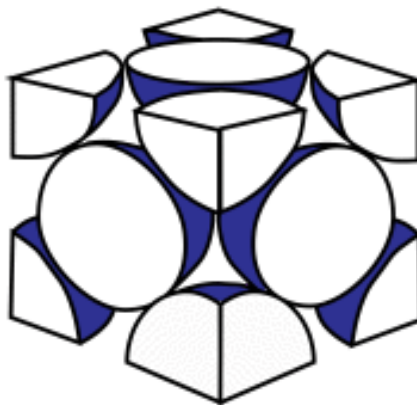
$P(\delta)$: gaya fungsi dari perpindahan

3 Struktur Octet Truss Lattice

Ada banyak variasi bentuk topologi *lattice* yang dapat dibuat sebagai struktur seluler yang periodik. Struktur tersebut dibangun dengan bentuk *honeycomb* [2], tetrahedral [3], 3D kagome [4], *octet-truss* [5], dan piramidal [6]. Menurut studi yang telah dilakukan Desphande dkk. [8]

struktur *octet-truss* merupakan struktur yang paling efektif untuk menyerap energi.

Octet truss lattice merupakan suatu struktur berpori yang memiliki respon mekanik *stretching-dominated* pada setiap batangnya [7]. Struktur *octet truss lattice* didesain sebagai struktur penyerap energi dengan *specific energy absorption* yang tinggi, puncak tegangan yang konstant antara tegangan luluh dan densifikasi, dan memiliki poisson ratio plastik yang mendekati nol [8]. *Octet-truss* merupakan salah satu struktur *lattice* yang terdiri dari dua geometri platonis yaitu *tetrahedron* dan *octahedron* Gambar 4. Menurut definisi dari padatan platonis merupakan susunan dari keseluruhan *truss* yang memiliki panjang sama dengan konfigurasi menyerupai kristal *face centre cubic* (FCC) seperti pada Gambar 3 dimana panjang *truss* dapat dianggap sebagai jarak terpendek dari interaksi atom-atomnya. Dengan konfigurasi bentuk yang sedemikian rupa struktur *octet-truss* memiliki respon elastik yang menyerupai material isotropik. *Octet-truss lattice* memiliki respon deformasi yang sama pada skala mikro, milimeter dan sentimeter [9], [10].



Gambar 3 Geometri Kristal Face Center Cubic [11]

Pemodelan geometri *octet-truss lattice* menggunakan perangkat lunak SpaceClaim. Geometri *truss* yang dibuat didapat dari penelitian [11]. *Octet-truss lattice* dibuat supaya setiap strut memiliki panjang yang sama. Diameter setiap *truss* dibuat tetap konstan. Dapat dilihat pada Gambar 4.

Densitas relatif $\bar{\rho}$ merupakan rasio antara massa jenis satu sel *lattice* terhadap massa jenis basis material. Perhitungan persamaan densitas relatif merujuk pada penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya oleh Mohr,dkk [12].

$$\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_s} \quad (3.1)$$

Untuk *octet-truss lattice* dengan penampang *struts* berupa silinder dengan jari-jari R dan panjang L densitas relatif dapat dihitung dengan persamaan :

$$\bar{\rho} = 6\sqrt{2} \pi \left(\frac{R}{L}\right)^2 - 54.6 \left(\frac{R}{L}\right)^3 \quad (3.2)$$

Dengan :

$\bar{\rho}$ = Densitas relatif

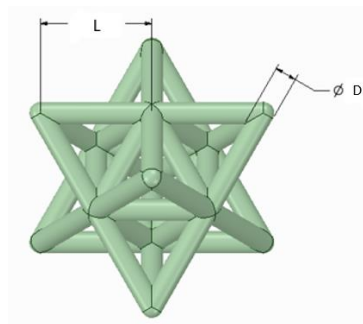
ρ = Densitas *lattice*

ρ_s = Densitas basis material

R = Radius silinder pada tiap *truss*

L = Panjang satu *truss*

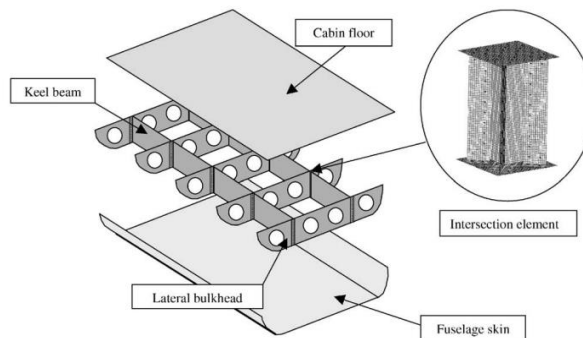
Struktur *octet-truss lattice* yang akan dianalisis memiliki dimensi basis material $60 \times 60 \times 60 \text{ mm}^3$.



Gambar 4 *Octet Lattice*

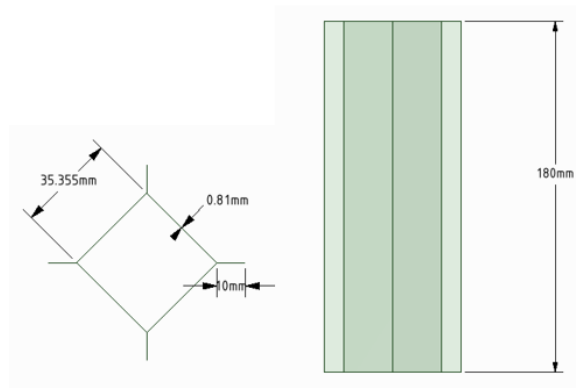
4 Struktur Subfloor Helikopter

Pada helikopter struktur layak tabrak di tempatkan pada bagian *subfloor*. Tipikal struktur *subfloor* pada helikopter konvensional mirip seperti struktur *subfloor* pada pesawat berukuran kecil, terdiri dari kerangka longitudinal *keel beams* dan *bulkheads* pada arah lateral pada Gambar 5. Struktur *subfloor* ini dilapisi oleh kulit badan bawah helikopter dan lantai kabin pada bagian atas. Tinggi total dari struktur *subfloor* helikopter berkisar 180 mm – 200 mm [13].



Gambar 5 Tipikal struktur *subfloor* helikopter AGUSTA [11]

Desain persilangan antara *keel beams* dan *bulkheads* menjadi elemen yang kritikal karena memiliki pengaruh yang besar terhadap respon tabrak dari *subfloor*. Detail struktur persilangan pada struktur *subfloor* dapat dilihat pada gambar 6.



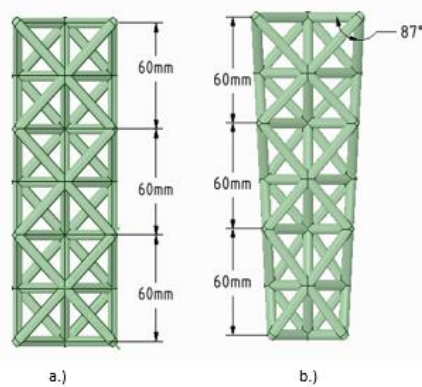
Gambar 6 Geometri Struktur Penyerap Energi *Cruciform Subfloor* [11]

5 Pemodelan *Octet-Truss Lattice* Pada Struktur *Subfloor*

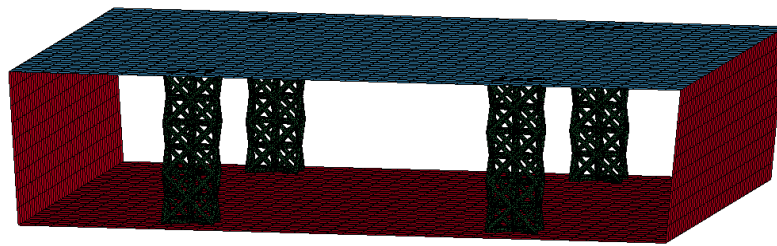
Dilakukan dua pemodelan desain *octet truss lattice* untuk diterapkan pada struktur *subfloor* helikopter yaitu konfigurasi *uniform* dan konfigurasi *double taper* pada Gambar 7(b). Konfigurasi *double taper* bertujuan untuk meminimalisir efek global buckling pada struktur [14]. Geometri *lattice* bertumpuk dibuat berdasarkan *octet-truss lattice* yang ditumpuk tiga tingkat. *Octet-truss lattice* yang digunakan memiliki geometri basis berdimensi $60 \times 60 \times 60 \text{ mm}^3$ dengan jari-jari silinder *truss* sebesar 4.1 mm dapat dilihat pada Gambar 7. Konfigurasi *lattice* bertumpuk ini akan digunakan untuk struktur pada *subfloor* helikopter sebagai struktur penyerap energi. Konfigurasi struktur *octet truss lattice* pada struktur *subfloor* dengan kedua konfigurasi dapat dilihat pada Gambar 8. Simulasi numerik dilakukan dengan perangkat lunak LS-Dyna. Material yang digunakan adalah Al-Si 12. Properti material dapat dilihat pada tabel 1. Peristiwa jatuhnya heikopter disimulasikan pada kecepatan 9 m/s (30 ft/s) berdasarkan FAR 27 [15].

Tabel 1 Properti material AlSi-12

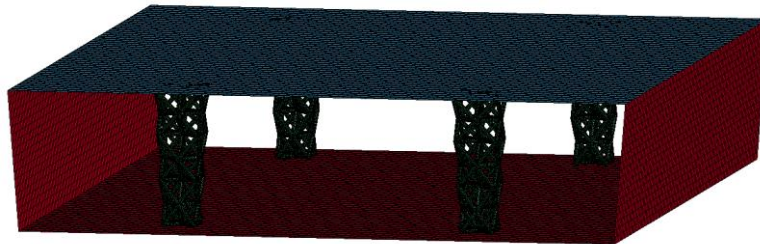
E	42.5766 GPa
ν	0.33
σ_{yield}	0.2205 GPa
ρ	2.65 E-6 kg/mm^3



Gambar 7 a) Konfigurasi *lattice uniform*. b) Konfigurasi *double taper*



(a)



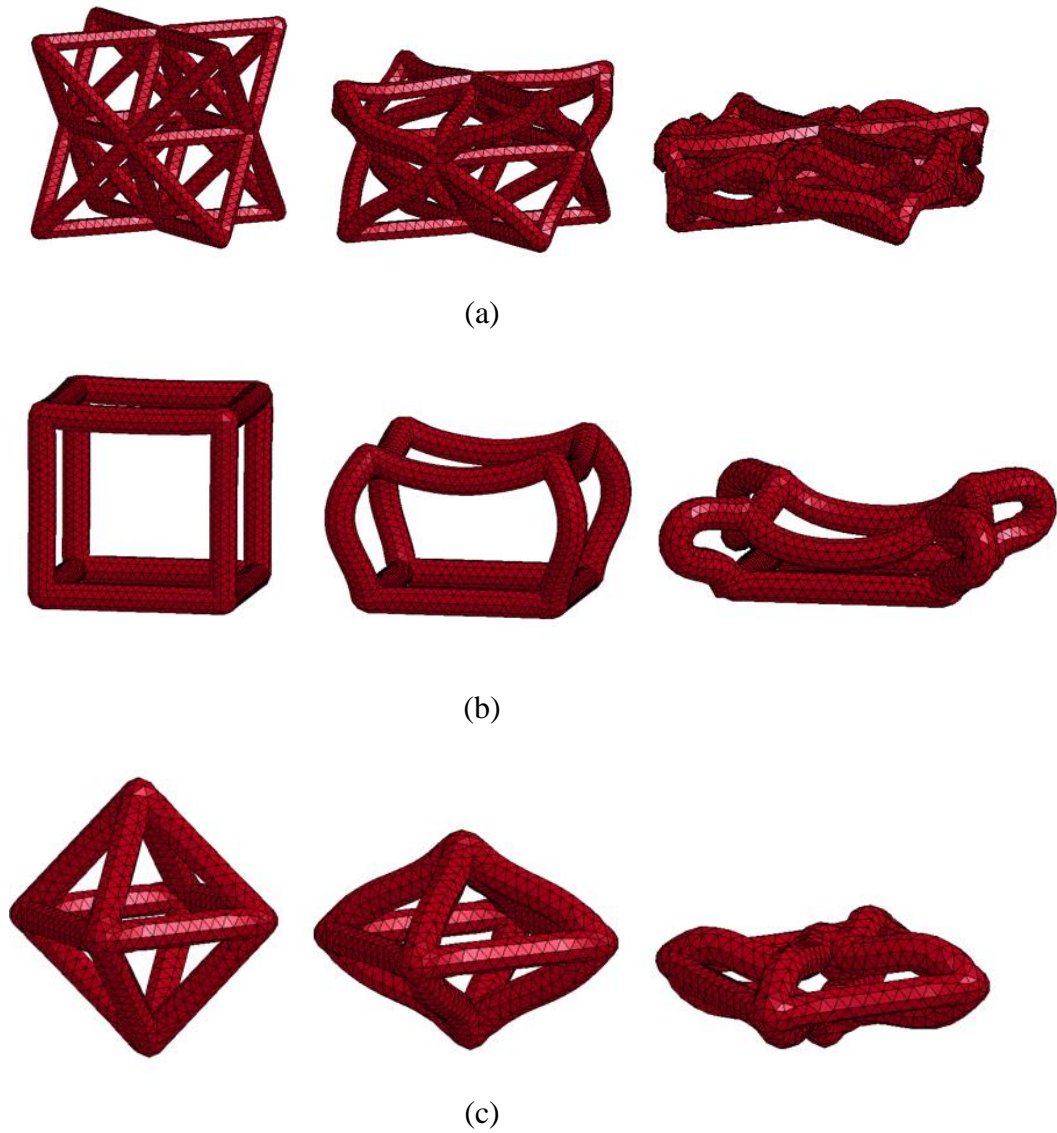
(b)

Gambar 8 Geometri struktur *subfloor* dengan (a) *Octe lattice*. (b) *Octet lattice double taper*

6 Hasil dan Diskusi

6.1 Penyerapan Energy Struktur *Lattice*

Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa specific energy absorption pada struktur unit cell *octet-truss lattice* dengan relative densitas 0.1, 0.2, dan 0.3 kg/mm³ berturut turut yaitu 36.4 kJ/kg, 46.7 kJ/kg, dan 63.8 kJ/kg. Berdasarkan hasil simulasi pada Tabel 2, *Octet-Truss* memiliki kemampuan menyerap energi yang lebih baik dibandingkan dengan dua *lattice* lainnya. Sehingga dapat dikatakan dari tiga jenis *lattice* yang dianalisis bahwa *octet-truss lattice* adalah geometri yang memiliki potensi untuk digunakan sebagai struktur penyerap energi yang baik. Gambar 9 menunjukkan mekanisme deformasi dari ketiga struktur *lattice*.

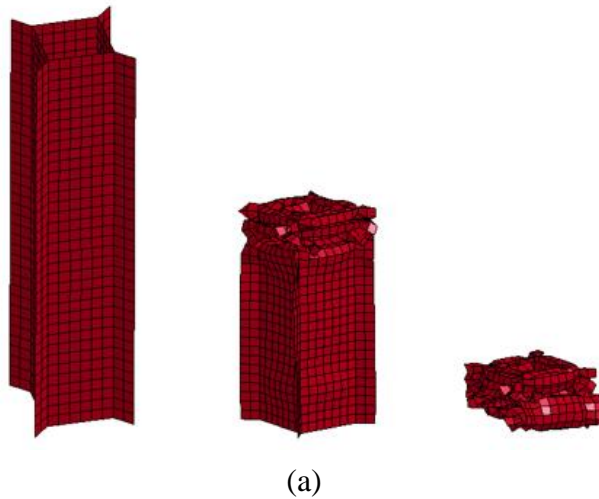


Gambar 9 Deformasi pada struktur (a) *Octet lattice* (b) *Kubik lattice*
(c) *Octahedron* pada densitas relatif 0.3 kg/mm^3

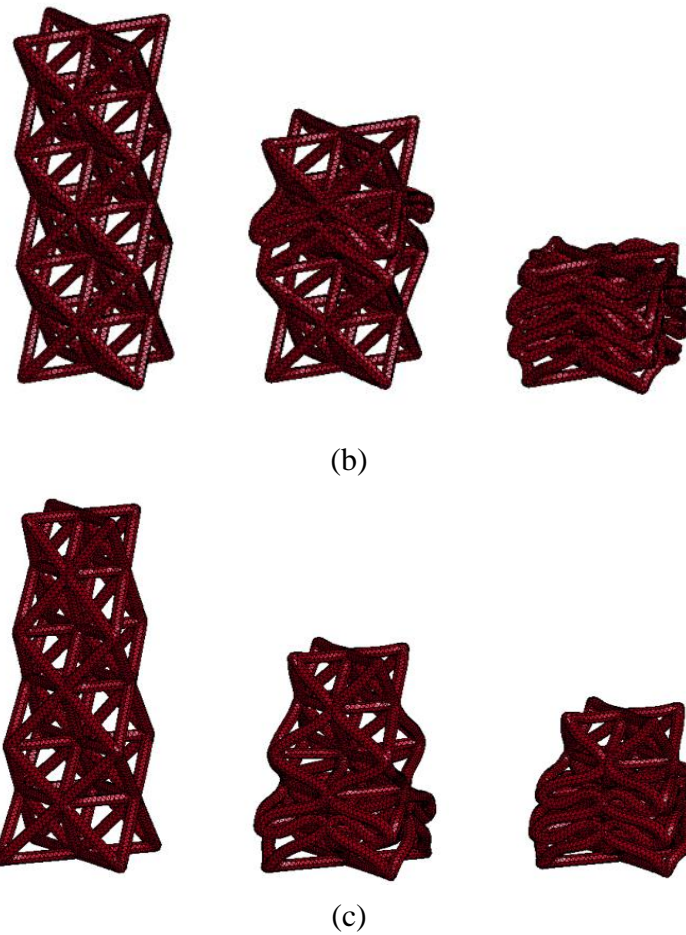
Tabel 2 Perbandingan *specific energy absorb lattice* berdasarkan densitas relatif

Jenis <i>Lattice</i>	Densitas relatif (kg/mm ³)	SEA (kJ/kg)
Octet	0.1	36.4
	0.2	46.7
	0.3	64
Kubik	0.1	33.8
	0.2	49
	0.3	37
<i>Octahedron</i>	0.1	31.7
	0.2	42.3
	0.3	60

Kemudian telah dilakukan simulasi impak pada tiga konfigurasi struktur. Dilakukan simulasi perbandingan antara struktur *octet-truss lattice* bertumpuk dengan struktur penyerap energi pada helikopter Agusta berbentuk *cruciform* dapat dilihat pada Gambar 10. Pada simulasi ini setiap konfigurasi dibebani dengan beban impak sebesar 250 kg dengan kecepatan 9 m/s. Hasil dari studi numerik didapatkan deformasi dan SEA dari konfigurasi struktur penyerap energi.



Gambar 10 Deformasi struktur (a) *Cruciform* (b) *Octet-Truss* bertumpuk dan (c) *Octet-truss double taper* (berlanjut ke halaman selanjutnya)



Gambar 10 (Lanjutan) Deformasi struktur (a) *Cruciform* (b) *Octet-Truss* bertumpuk dan (c) *Octet-truss double taper*

Hasil dari perhitungan *specific energy absorb* dari masing-masing struktur dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

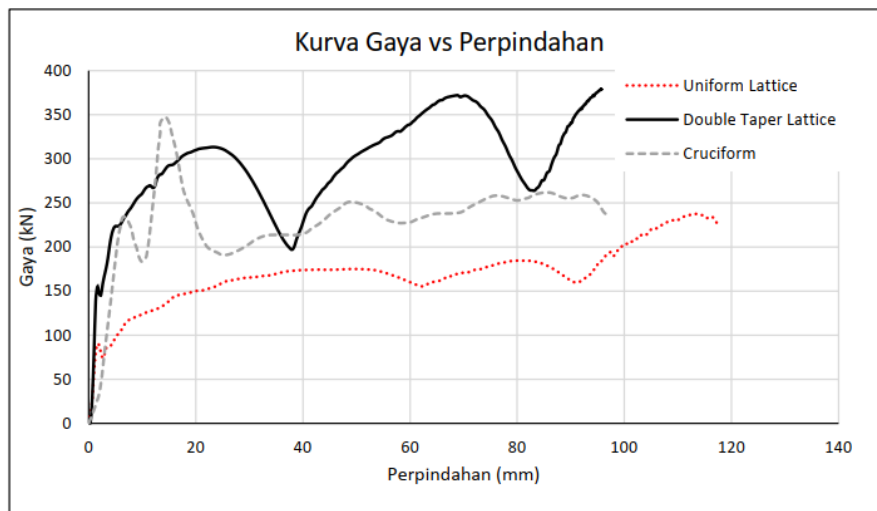
Tabel 3 *Specific energy absorbtion Cruciform, Octet-Truss bertumpuk dan Octet-truss double taper*

Struktur	SEA(kJ/kg)
<i>Cruciform</i>	12.8
<i>Octet bertumpuk uniform</i>	32
<i>Octet bertumpuk double taper</i>	48.5

Dari hasil analisis numerik yang telah dilakukan dan telah diperoleh hasil bahwa *octet lattice* dengan konfigurasi *double taper* memiliki *specific energy absorb* yang terbesar yaitu 42.8 kJ/kg yang berarti merupakan struktur yang sangat efisien untuk digunakan sebagai struktur penyerap energi.

6.2 Respon Struktur *Subfloor* Helikopter

Pada bagian ini akan dijelaskan hasil simulasi aplikasi struktur penyerap energi tabrak pada struktur *subfloor* helikopter Agusta dengan beban sesuai FAR 27. Kemudian akan dibandingkan dengan respon struktur penyerap energi asli (*cruciform*) dari helikopter Agusta. Pada konfigurasi helikopter Agusta terdapat 10 buah struktur *cruciform* seperti pada Gambar 5 dan 6. Untuk konfigurasi struktur *octet-truss lattice* pada *subfloor* mengikuti Gambar 8. Hasil pemodelan ditampilkan hasil yang diperoleh dengan analisis numerik yang dilakukan dengan perangkat lunak LS-DYNA. Hasil analisis yang akan dipaparkan berupa kurva gaya vs perpindahan dan *specific energy absorb* pada setiap jenis struktur penyerap energi.



Gambar 11 Kurva gaya vs perpindahan

Kurva gaya vs perpindahan berguna untuk melihat gaya yang terjadi pada struktur penyerap energi untuk setiap deformasi. Dari kurva ini kita dapat melihat respon struktur penyerap energi dan gaya maksimum yang terjadi saat tabrakan. Kurva ini didapat dari kontak antara struktur penyerap energi dengan lantai helikopter. Kurva ini nantinya dapat berguna untuk menentukan kekuatan yang harus dimiliki oleh lantai supaya tidak terjadi penetrasi ke kabin penumpang.

Dari Gambar 11 kurva gaya vs perpindahan terlihat pada struktur *octet-lattice* memiliki tiga puncak gaya. Puncak gaya ini merupakan representasi dari deformasi lipatan satu sel *lattice* sehingga dengan konfigurasi tiga sel, struktur *lattice* memiliki tiga puncak gaya. Pada kurva diatas terlihat gaya paling besar terjadi pada struktur *lattice* dengan konfigurasi *double taper*. Pada konfigurasi *subfloor* dengan struktur *lattice* terlihat ada tiga puncak kurva yang masing-masing menggambarkan proses lipatan pada setiap unit *lattice*, karena konfigurasi yang digunakan memakai tiga unit *lattice* sehingga menimbulkan tiga puncak pada kurva. Terlihat pada Gambar 11 daerah dibawah kurva dari struktur *cruciform* lebih besar dibandingkan struktur *octet lattice uniform*, ini mengindikasikan bahwa energi serap pada struktur *cruciform* lebih besar dari struktur *octet lattice uniform*. Daerah dibawah kurva dari struktur *octet lattice double taper* merupakan yang terbesar sehingga energi yang diserap merupakan yang terbesar dari ketiga struktur. Struktur *octet lattice double taper* memiliki kekuatan yang jauh lebih besar dari *octet bertumpuk uniform* ini karena dengan menambahkan konfigurasi *double taper* akan menambah dominasi stretching pada *lattice* dan mengurangi dominasi *bending* sehingga membuat struktur menjadi lebih kuat dan mampu menyerap energi yang lebih besar. Ini yang menyebabkan gaya yang terjadi pada struktur *lattice bertumpuk double taper* memiliki gaya yang dua kali lipat lebih besar dibandingkan *lattice bertumpuk uniform*.

Selanjutnya ketiga konfigurasi struktur dilihat efektifitas penyerapan energi dari parameter SEA. Energi serap dihitung dengan cara melakukan integrasi antara gaya dan perpindahan atau deformasi yang terjadi pada struktur. Hasil perhitungan energi tersebut yang akan di bagi dengan massa struktur. Berikut pada Tabel 4 ditampilkan nilai SEA dari tiga konfigurasi.

Tabel 4 *Specific energy absorbtion* pada struktur subfloor

	<i>Cruciform</i>	<i>Lattice Uniform</i>	<i>Lattice Double Taper</i>
Energi serap (kJ)	22.27	21.98	31.05
Massa (kg)	3.43	0.98	0.91
Specific energy absorb (kJ/kg)	6.5	22.36	34.44

Hasil menunjukkan struktur *lattice* memiliki SEA yang lebih besar dari struktur konvensional *cruciform*. Ini terjadi karena penyerapan energi pada *lattice* melalui mekanisme *buckling* pada batang, *bending* pada dinding batang, dan kompresi pada bagian tengah batang. Ketiga mekanisme yang terjadi pada struktur *octet lattice* terjadi secara simultan ada setiap bagian sehingga menimbulkan deformasi yang efektif pada setiap elemen struktur. Deformasi yang terjadi secara efektif pada setiap elemen dari batang-batang struktur menyebabkan penyerapan energi terjadi pada seluruh bagian dari *lattice* menjadi lebih besar dibandingkan dengan struktur *cruciform* sehingga struktur *lattice* memiliki nilai SEA yang lebih tinggi dibandingkan struktur *cruciform*.

7 Kesimpulan

1. Hasil analisis numerik menunjukkan bahwa densitas relatif dengan nilai *specific energy absorb* (SEA) tertinggi untuk struktur *octet-lattice* adalah 0.3 kg/mm^3 .
2. Konfigurasi struktur penyerap energi dengan SEA yang tertinggi adalah konfigurasi *octet-lattice* dengan *double taper* yaitu 42.8 kJ/kg .
3. Dari hasil simulasi *drop weight test* dengan perangkat lunak LS-DYNA. Konfigurasi *lattice double taper* merupakan yang paling kuat karena belum terdeformasi seluruhnya setelah dikenakan beban dinamik. Struktur *lattice double taper* juga dapat menyerap energi kinetik dari tabrakan sebesar 31.05 kJ .
4. Konfigurasi *lattice double taper* merupakan struktur penyerap energi yang paling efisien dengan *specific energy absorb* sebesar 34.44 kJ/kg .

5. Dengan menambahkan konfigurasi *double taper* pada struktur *lattice* dapat mengurangi dominasi *bending* dan meningkatkan dominasi *stretching* yang membuat lebih kuat sehingga membutuhkan gaya yang besar. Ini yang menyebabkan gaya yang terjadi pada struktur *octet lattice* bertumpuk *double taper* memiliki gaya yang dua kali lipat lebih besar dibandingkan *octet lattice* bertumpuk uniform.
6. Dengan nilai *specific energy absorb* yang lebih besar dibandingkan struktur konvensional konfigurasi struktur *octet lattice* memiliki potensi yang besar untuk digunakan sebagai struktur penyerap energi.

8 Reference

- [1] *IHST-ICS.com/diakses 20 mei 2018.*
- [2] Dharmasena, Kumar P., Wadley, Haydn N.G., Xue, Zhenyu, Hutchinson, John W., 2008. Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading. *Int. J. Impact Eng.* 35, 1063–1074.
- [3] Sypeck, David J., Wadley, Haydn N.G., *Cellular Metal Truss Core Sandwich Structures*, *Adv. Eng. Mater.* 4, 759–764, 2002.
- [4] Lim, Ji-Hyun, Kang, Ki-Ju, *Mechanical Behavior of Sandwich Panels with Tetrahedral and Kagome Truss Cores Fabricated from Wires*. *Int. J. Solids Struct.* 43, 5228–5246, 2006.
- [5] L. Dong, V. Deshpande, H. Wadley, *Mechanical Response of Tie6Al4V Octettruss Lattice Structures*, *Int. J. Solids Struct.* 60e61 107e124, 2015.
- [6] Kooistra, Gregory W., Deshpande, Vikram S., Wadley, Haydn N.G., *Compressive Behavior of Age Hardenable Tetrahedral Lattice Truss Structures Made from Aluminium*, *Acta Mater.* 52, 4229–4237, 2004.
- [7] T.A. Schaedler, A.J. Jacobsen, A. Torrents, A.E. Sorensen, J. Lian, J.R. Greer, et al., *Ultralight Metallic Microlattices*, *Science* 334, 962-965, 2011.

- [8] V.S. Deshpande, M.F. Ashby, N.A. Fleck, *Foam Topology: Bending Versus Stretching Dominated Architectures*, Acta Mater. 49 (2001a) 1035-1040.
- [9] Fuller, R.B., *Octet Truss*. U.S. Patent Serial No. 2, 986, 241, 1961.
- [10] V.S. Deshpande, N. a. Fleck, M.F. Ashby, *Effective Properties of the Octet-Truss Lattice Material*, J. Mech. Phys. Solids 49 (2001b) 1747-1769.
- [11] Tancogne-Dejean, Thomas, Adriaan B. Spierings, dan Dirk Mohr, *Additively-Manufactured Metallic Micro-Lattice Materials for High Specific Energy Absorption Under Static and Dynamic Loading*. Department of Mechanical and Process Engineering, ETH Zurich, Switzerland. 2016.
- [12] D. Mohr, *Mechanism-Based Multi-Surface Plasticity Model for Ideal Truss Lattice Materials*, Int. J. Solids Struct, 42, 3235-3260, 2005.
- [13] Bisagni, Chiara, *Crashworthiness of Helicopter Subfloor Structures*, Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Politecnico di Milano, 2002.
- [14] Le Hoai Tam, *The Influence Of Sheet Metal Forming In The Axial Crushing Behavior Of Thin-Walled Columns*. Master Thesis. Faculty Of Mechanical and Aerospace, ITB, Indonesia. 2017.
- [15] Federation Aviation Administration, *Federal Aviation Regulations Part 25 - Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes*, FAA, Washington DC, USA, 1997.