

FINITE ELEMENT ANALYSIS PADA CRASHWORTHINESS UNTUK MENENTUKAN SPECIFIC ENERGY ABSORBER PADA THIN-WALLED BIONIC- BAMBOO

FINITE ELEMENT ANALYSIS IN CRASHWORTHINESS TO DETERMINE SPECIFIC ENERGY ABSORBER ON THIN-WALLED BIONIC-BAMBOO

Bagas Arganto Prabowo¹, Rino Andias Anugraha², Teddy Sjafrizal³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Telkom

¹bagasarganp@student.telkomuniversity.ac.id, ²rinoandias@telkomuniversity.ac.id,

³teddysjafrizal@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Bio-Inspired telah menjadi perhatian beberapa tahun terakhir karena memiliki struktur yang baik dan memiliki fitur mekanik yang unik. Desain tabung *Thin-Walled* yang menerapkan struktur *Bio-Inspired Rib* pada bambu dengan konfigurasi *multi-cell*, dengan tujuan menambah *specific energy absorption* (SEA). *Rib* pada Bambu memiliki kekuatan yang baik karena mampu menahan beban lingkungan seperti angin dan hujan. Inspirasi pada desain *rib* bambu akan dioptimasi pada struktur *Thin-Walled* dengan konfigurasi 4 *cross-sectional rib* dengan desain (*I-Shape*), (*V-Shape*), (*O-Shape*) dan (*X-Shape*). Efek dari *cross-sectional rib* akan dievaluasi menggunakan metode *finite element*. Untuk menghasilkan nilai *specific energy absorption* (SEA) optimal dibutuhkan desain faktor input yang sesuai. Metode Taguchi akan digunakan untuk menentukan desain faktor yang cocok untuk pengujian ini, terdapat 2 desain faktor yaitu desain *rib* dan ketebalan dengan masing masing faktor memiliki 4 jumlah level, maka dengan hal ini dilakukan eksperimen sebanyak 16 kali, hal ini berdasarkan $L_{16}(4^2)$ *full factorial* pada *orthogonal array*. Untuk hasil pengolahan data yang telah dilakukan desain faktor optimal pada faktor desain adalah pada Level 4 dengan bentuk *rib X-* dan *Shape* pada faktor ketebalan 1.8mm yang menghasilkan nilai *specific energy absorption* (SEA) 67.022 J/g.

Kata kunci: *Thin-Walled*, metode taguchi, *finite element*, *Bionic-Bamboo*, *Bio-Inspired*

Abstract

Bio-Inspired has been a concern in recent years because it has a good structure and has unique mechanical features. *Thin-walled tube design* that applies the *Bio-Inspired Rib* structure to bamboo in a *multi-cell configuration*, with the aim of increasing *specific energy absorption* (SEA). *Rib* on Bamboo has good strength because it is able to withstand environmental loads such as wind and rain. Inspiration on bamboo rib design will be optimization in *Thin-Walled* structures with 4 *cross-sectional rib* configurations with designs (*I-Shape*), (*V-Shape*), (*O-Shape*) and (*X-Shape*). The effects of *cross-sectional rib* will be evaluated using the *finite element method*. To produce the optimal *specific energy absorption* (SEA) value, an appropriate input factor design is needed. The Taguchi method will be used to determine the design factors that are suitable for this test, there are 2 design factors, namely the *rib* design and thickness with each factor having 4 number of levels, then with this experiment carried out 16 times, this is based on $L_{16}(4^2)$ *full factorial* on *orthogonal arrays*. For the results of data processing that has been done the optimal factor design on the design factor is at Level 4 with the *rib X-Shape* shape and at a thickness factor of 1.8mm which results in a *specific energy absorption* (SEA) value of 67,022 J / g.

Keywords: *Thin-Walled*, Taguchi Method, *finite element*, *Bionic-Bamboo*, *Bio-Inspired*

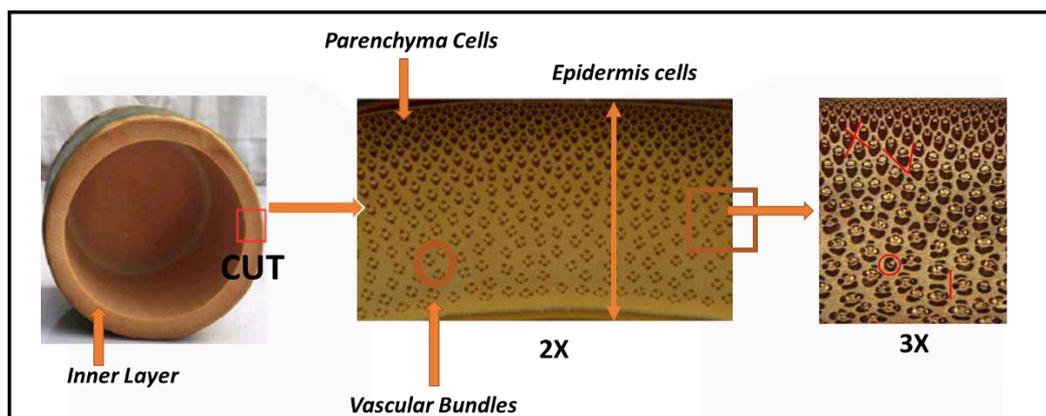
1. Pendahuluan

Kecelakaan lalu lintas menjadi perhatian khusus pada industri otomotif, kecelakaan tidak hanya merugikan secara aspek ekonomi akan tetapi juga pada keselamatan penumpang. Struktur *crashworthiness* bertujuan untuk mengurangi resiko kecelakaan yang mengakibatkan cedera besar maupun kematian pada penumpang [1]. Terdapat beberapa aspek yang perlu dipertimbangkan dalam pengembangan struktur *crashworthiness* yaitu aspek penyerapan energi serta aspek berat dari struktur *crashworthiness*. *Thin-Walled* umumnya digunakan dalam struktur *crashworthiness* guna untuk penyerapan energi yang baik serta memiliki material yang ringan [2]. Keuntungan dari penggunaan struktur *Thin-Walled* ini adalah memiliki berat massa yang ringan, biaya produksi rendah, dan mudah diproduksi. Struktur *Thin-Walled* pertama dikembangkan oleh Abramowicz [3] yang menyatakan bahwa *axial crushing square* memiliki penyerapan energi yang baik. Nia dkk. [4] membandingkan performa penyerapan energi dari geometri *cylindrical*, *hexagonal*, dan *square tube* dengan pengujian *axial quasi-static loading* yang menghasilkan bahwa struktur *cylindrical tube* memiliki nilai penyerapan energi tertinggi. Akan tetapi desain yang dikembangkan memiliki

kekurangan yaitu memiliki penyerapan energi yang kurang optimal, hal ini disebabkan oleh struktur *single cell* yang memiliki *high initial peak force*. Untuk mengatasi masalah ini dikembangkan konfigurasi struktur baru dari *Thin-Walled* yaitu struktur *multi-cell*. Konfigurasi *multi-cell* mampu meningkatkan penyerapan energi, menurut Zhang dkk. [5] Nilai penyerapan energi dari struktur *multi-cell columns* ini lebih besar 120% dan 220% dibandingkan dengan *single cell columns*. Penelitian mengenai *multi-cell* berlanjut pada metode implementasi struktur *Bio-Inspired* pada alam. *Bio-Inspired* adalah penerapan *biological* sistem dengan tujuan meningkatkan kemampuan produk [6]. Struktur alam memiliki properti yang sangat unik untuk beradaptasi dalam kondisi ekstrim setelah miliaran tahun evolusi, kemampuan dari desain alam tersebut terbukti memiliki *stiffness* yang baik dan dapat mengkombinasikan dengan berat struktur yang ringan [7].

Banyak tanaman yang mampu menjadi referensi struktur *Thin-Walled*, jenis tanaman seperti bambu, *cattail* dan *horse tail* mampu menahan beban lingkungan ketika berada di alam. Zou dkk. [7] melakukan penelitian bahwa tes pada batang bambu (*Phyllostachys pubescens*), umur bambu yang diuji adalah 1, 3 dan 5 tahun dengan hasil batang bambu berumur lebih muda memiliki *tensile strength* yang tertinggi dengan nilai *stress* 251 MPa. Nilai *stress* pada bambu berumur 1 tahun lebih besar 1.85 kali dibandingkan nilai *stress aluminium alloy (2A12)*. Bambu memiliki bentuk geometri yang relatif *uniform* pada bagian *culm hollow*, hal ini menyebabkan bambu memiliki *structural stability* yang baik. Penelitian yang dilakukan oleh Liu dkk. [8] menunjukkan nilai penerapan struktur *multi-cell* dengan desain dari bambu dan palm memiliki nilai penyerapan energi yang lebih unggul dibandingkan dengan struktur *single-cell tube*. Hal ini menjadi tantangan bagi penerapan struktur *bionic* bambu, struktur bambu memiliki potensi yang cukup kuat untuk menjadi struktur penyerap energi dalam rekayasa kendaraan.

Observasi lebih dalam dilakukan pada batang bambu yang akan menjadi referensi penerapan pada struktur *multi-cell* bambu. Pada **Gambar 1** *cross-sectional* dari circular bambu terdapat moso sel yang berbentuk bulat dan elips, serta bambu dikelilingi oleh sel epidermis dalam dan luar, jaringan epidermis bertujuan untuk memperkuat bambu dari cuaca dan beban lingkungan. Dinding epidermis *cells* pada bambu menjadi inspirasi dalam penerapan struktur *multi-cell*, terdapat beberapa bentuk pola *vascular bundles* pada *parenchyma cells* bambu.

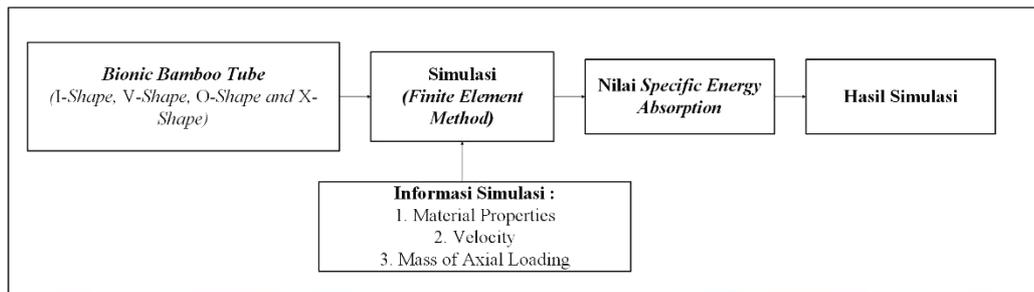


Gambar 1 Struktur *Vascular Bundles Bionic* Bambu

Terdapat 4 konfigurasi rib pada desain *multi-cell* ini. Analisa pengembangan formula dari tabung *multi-cell* menggunakan *feasibility of theoretical mode* yang telah divalidasi dengan pengembangan formula dan evaluasi efek geometri pada parameter dalam sistem penyerapan energi. Pengujian akan menggunakan simulasi *Finite Element Analysis (FEA)*. FEA adalah teknik yang digunakan secara global dalam desain, analisis, dan optimalisasi. Untuk simulasi, FEA terbukti menjadi alat yang berguna untuk memahami deformasi mekanisme dan respons tabung menyerap *specific energy absorption (SEA)* yang terkena dampak tumbukan.

2. Finite Element Modeling

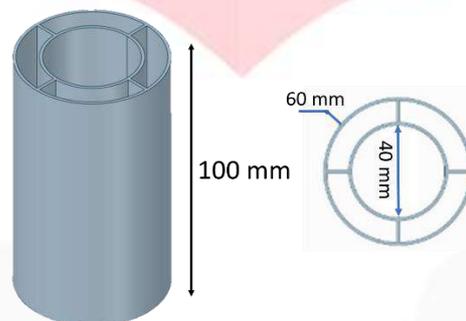
Langkah awal dari simulasi ini adalah merancang skenario berdasarkan spesifikasi parameter yang telah ditentukan. Pada langkah simulasi eksperimen *Bionic Bamboo Tube* diuji menggunakan software ABAQUS untuk mengetahui grafik *Force* dan *Displacement* yang berguna untuk menghitung total penyerapan energi. Pada **Gambar 2** langkah pertama dalam simulasi adalah merancang desain. Rancangan desain pada simulasi ini berdasarkan dari *vascular bundle* pada **Gambar 1** yang terdiri dari 4 *cross-sectional* geometri. Langkah selanjutnya adalah simulasi *Finite Element Method* pada desain terpilih, variabel yang mempengaruhi simulasi ini adalah *Material Properties*, *Velocity* Tumbukan dan *Massa berat* dari *axial loading*. Hasil dari simulasi yang telah dilakukan adalah nilai *Specific Energy Absorption (SEA)*.



Gambar 2 Model Skenario Simulasi

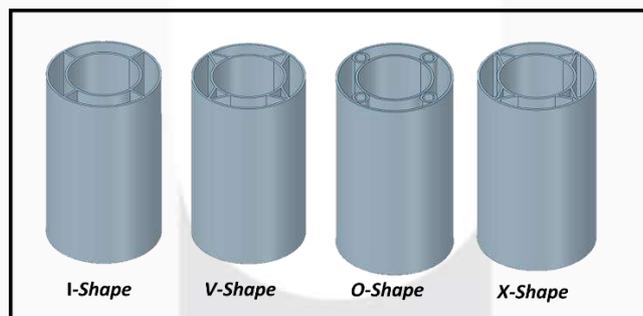
2.1 Design Consideration

Dalam membuat model desain dilakukan pengambilan data baik langsung dan tidak langsung, observasi pada Model CAD ini dilakukan pada sel parenkim dari bambu yang dikelilingi dua *layer* yaitu *inner layer* dan *outer layer*. Identifikasi struktur ini berlanjut pada *rib* antar *layer* yang memiliki konfigurasi yang unik yang dinamakan *parenchyma cells* yang terdiri dari berbagai macam bentuk. Pada Gambar 1 menunjukkan struktur bambu saling berkoneksi satu sama lain nya *Vascular Bundle* dan *Epidermis* mengisi bagian antara *Inner* dan *Outer layer* hal ini yang menjadikan inspirasi *Bionic Bamboo Tube* yang akan dimodelkan dalam CAD.



Gambar 3 Desain Geometri I-Shape

Pada Gambar 3 diameter *inner layer* akan dibatasi 40 mm serta diameter *outer layer* akan dibatasi 60mm. Panjang dari geometri adalah 100 mm serta ketebalan dinding 1.8 mm.

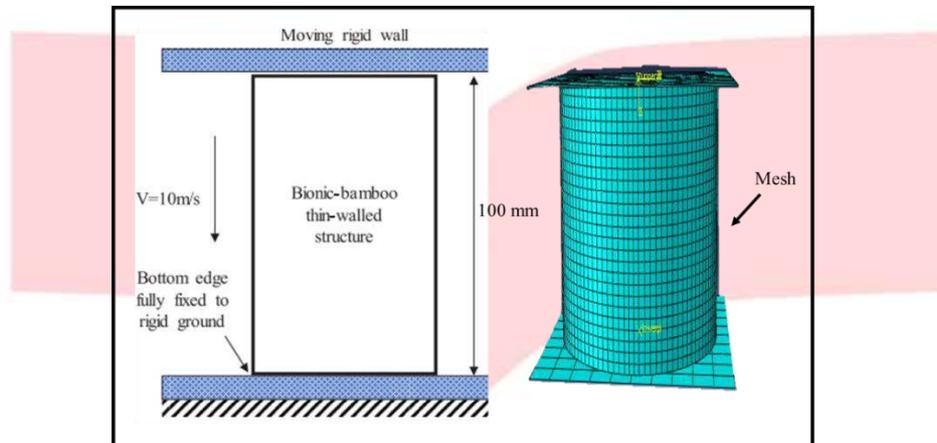


Gambar 4 CAD Bionic Bamboo Tube

Pada Gambar 4 hasil CAD berdasarkan *Vascular Bundle* yang memiliki 4 *cross-sectional* yang berbentuk *I-Shape* dengan bentuk I pada *rib*, *V-Shape* dengan bentuk V pada *rib*, *O-Shape* dengan bentuk O pada *rib* dan *X-Shape* dengan bentuk X pada *rib*.

2.2 Crash Simulation setup

Untuk mengeksplorasi mekanisme deformasi dari *Bionic Bamboo Tube*, dilakukan simulasi numerik dengan *explicit dynamics* pada tabung dengan menggunakan simulasi elemen hingga dengan *Software ABAQUS 16.1*. Lapisan dinding tabung dimodelkan dengan bentuk dinding *shell 3D (3D Deformable Shell Extrusion)*. Seluruh model dalam studi ini terdiri dari struktur dinding tipis yang diteliti, *striker*, dan *base*. Struktur tabung berdinding tipis dimodelkan dengan menggunakan elemen 4 simpul *kontinum shell (S4R)* dengan 5 titik integrasi di sepanjang arah ketebalan elemen.



Gambar 5 Konfigurasi *Finite Element ABAQUS*

Pada **Gambar 5** *Striker* dimodelkan sebagai *rigid body* dengan memakai satu perpindahan translasi. Kecepatan tumbukan *striker* pada tabung dimodelkan menjadi 10 m/s dengan massa 275 kg. Nilai kecepatan crash diambil dari *New Car Assessment Program (NCAP)* oleh *National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)*. Pada penentuan massa diasumsikan 25% dari berat maksimum mobil (1.100 kg) [10]. Berikut adalah *simulation setup* dengan menggunakan *software ABAQUS*:

Tabel 1 *Simulation Setup*

NO	Langkah	Deskripsi	
1	<i>Material Properties</i>	Material yang dipilih adalah Alumunium Alloy 6063T5	
2	<i>Geometri</i>	Masukan 3D <i>model</i> yang telah dibuat dengan <i>software CAD</i>	
3	<i>Model</i>	<i>Fixed Suppot</i>	Menentukan geometri sebagai <i>striker</i> dan <i>base</i> , seperti pada Gambar 5 . <i>fixed geometry</i> terletak pada <i>moving rigid wall</i>
		<i>Force</i>	Atur nilai <i>Force</i> pada <i>striker</i> dengan massa seberat 275 kg dan atur <i>velocity</i> pada <i>striker</i> sebesar 10 m/s
		<i>Mesh</i>	<i>Mesh</i> merupakan langkah untuk melakukan pembagian dan penentuan tipe elemen <i>type part</i> ataupun <i>assembly</i> , <i>mesh</i> yang digunakan pada seluruh model adalah 0.4 mm
		<i>Solution</i>	Identifikasi hasil simulasi yang diinginkan, pada simulasi ini hasil yang diperoleh adalah <i>Force</i> dan <i>Displacement</i>
4	<i>Setup</i>	Langkah ini akan otomatis selesai ketika simulasi telah berakhir dan seluruh pengaturan telah sesuai	
5	<i>Result</i>	Menampilkan hasil dari simulasi	

2.3 Material Properties

Material yang digunakan pada eksperimen ini adalah aluminum alloy 6063T5 untuk mendapatkan sifat mekanik yang lebih spesifik simulasi ini menggunakan Johnson–Cook hardening seperti pada **Tabel 3** berikut :

Tabel 1 Aluminum Alloy 6063T5 johnson-cook parameter [9].

Parameter	Value	Description
A	200 Mpa	Material parameter
B	144 Mpa	Material parameter
n	0.62	Strain power coefficient
C	0	Material parameter
m	1	Temperature power coefficient
ρ	2700 kg/m ³	Density

Menurut Liu dkk. [7] untuk mencapai struktur yang ringan diperlukan lightweight material seperti Aluminium dengan sepertiga density dari baja memiliki penyerapan energi yang luar biasa serta memiliki high peak load dengan nilai 38.03 kN

2.4 Crashworthiness Criteria

Untuk mengevaluasi kinerja struktur tabung Bionic Bamboo Tube saat axial loading, terdapat beberapa indikator kelayakan yaitu *Energy Absorption* dan *Specific Energy Absorption* (SEA). *Energy Absorption* didefinisikan sebagai perubahan permukaan pada struktur tumbukan, kemampuan struktur dinilai dari penyerapan energy serta nilai puncak yang dicapai saat ada tumbukan. *Energy Absorption* dapat dihitung seperti rumus dibawah ini :

$$EA(d) = \sum Si = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n (F_i + F_{i+1})(y_{i+1} - y_i)$$

Di mana F menunjukkan gaya benturan dan δ mewakili deformasi. Selanjutnya SEA didefinisikan sebagai energi diserap per unit massa.

$$SEA = \frac{EA}{m} = \frac{\sum Si = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n (F_i + F_{i+1})(y_{i+1} - y_i)}{m}$$

EA adalah total energi yang diserap pada akhir crush, m adalah massa. Karena itu SEA bukan properti material intrinsik, tidak hanya tergantung pada sifat material, tetapi juga pada beberapa parameter lain, terutama geometri specimen.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Eksperimen

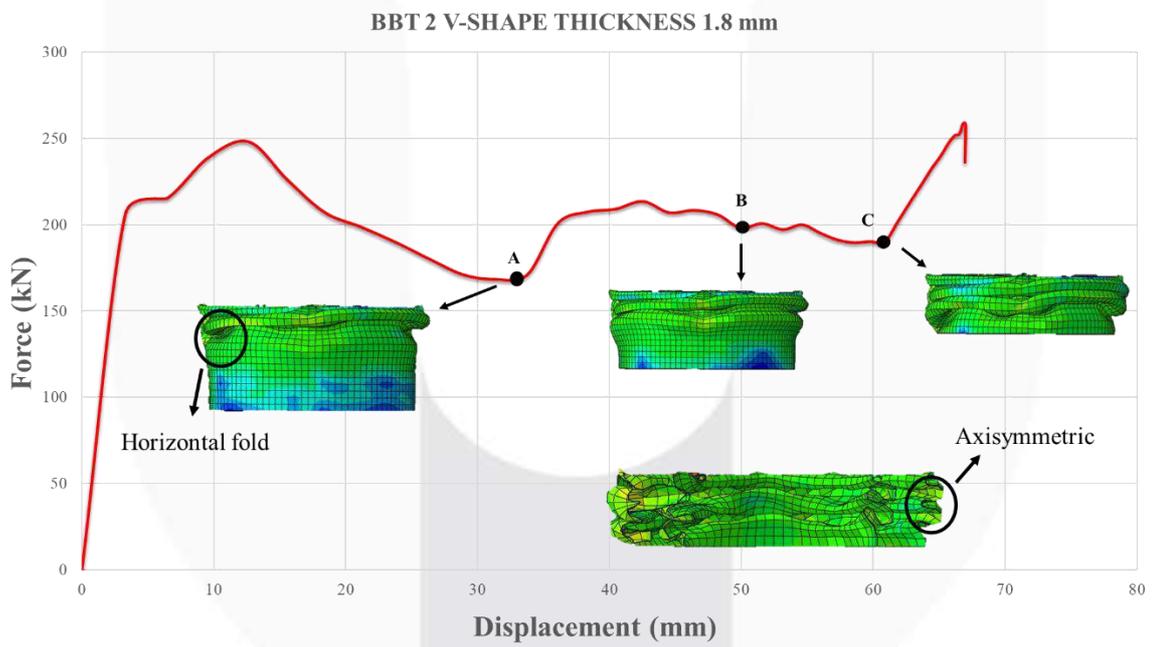
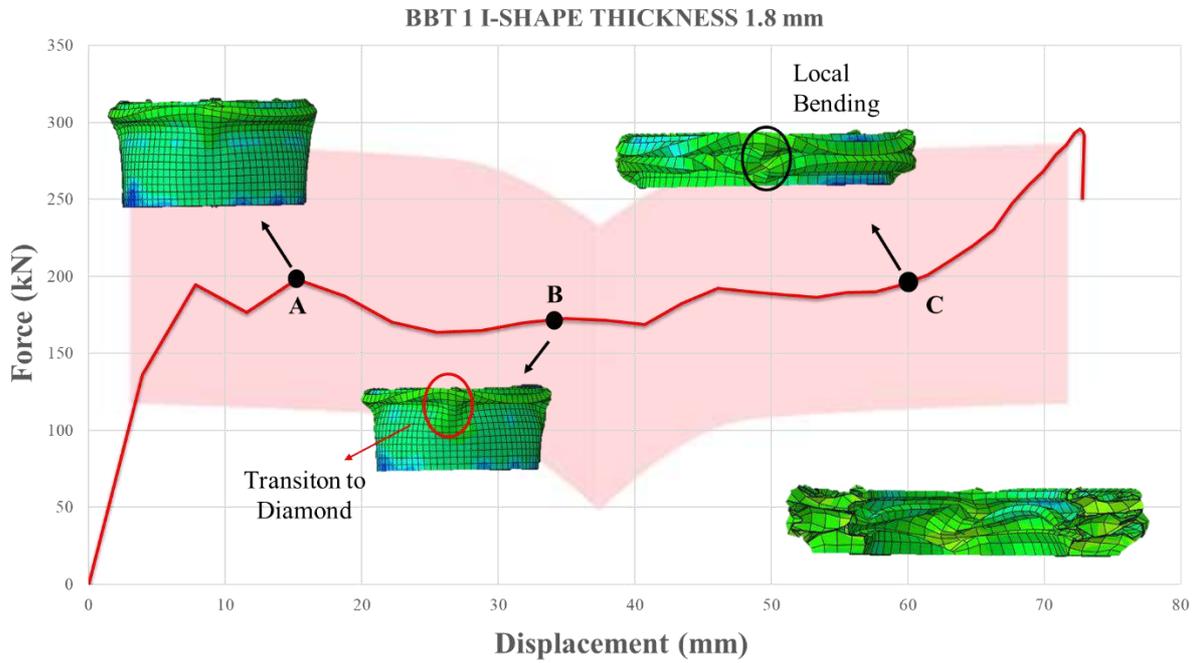
Setelah melakukan simulasi berdasarkan simulasi menggunakan *software* ABAQUS 16.1 dengan rancangan eksperimen dan *material properties* yang telah dijelaskan pada **Tabel 1** maka hasil dari simulasi adalah sebagai berikut:

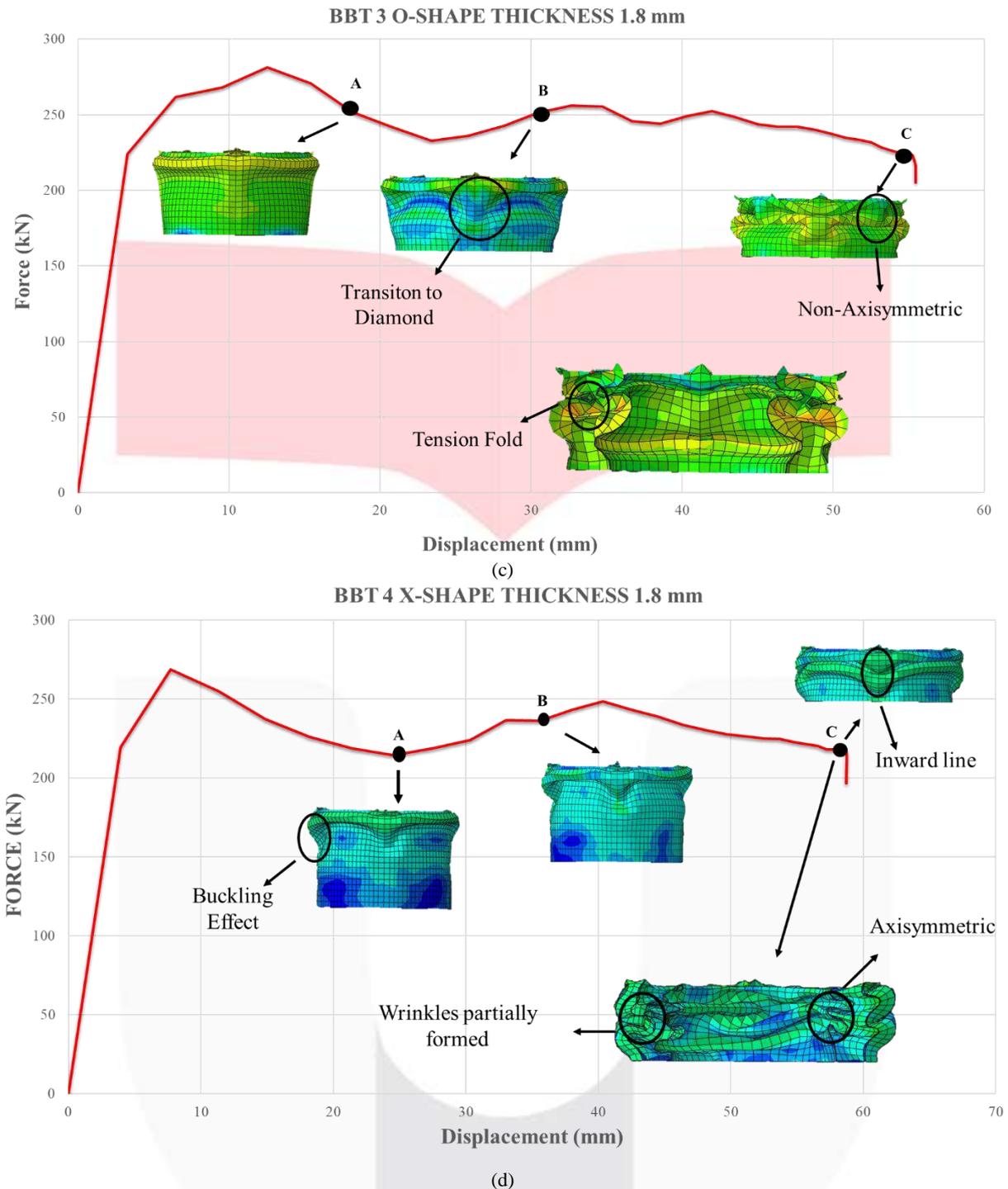
Tabel 2 Hasil Simulasi

NO	Desain	Energy Absorption (EA) (kJ/g)	Specific Energy absorbtion (SEA) (J/g)	Mass Tube (g)
1	BBT 1 (I-SHAPE)	9510.256	62.283	160
2	BBT 2 (V-SHAPE)	11252.831	61.682	180
3	BBT 3 (O-Shape)	12305.855	64.170	188
4	BBT 4 (X-Shape)	12300.729	67.022	186

Pada **Tabel 2** menunjukkan hasil nilai simulasi pada setiap desain, tabel hasil simulasi yang ditinjau dari nilai *specific energy absorber* (SEA) pada desain tube. Dapat dilihat pada nilai *energy absorber* desain BBT 3 memiliki nilai *Energy Absorption* (EA) terbaik, namun dalam perhitungan *specific energy absorber* (SEA) nilai EA akan dibagi dengan massa berat dari tube. Dari eksperimen yang dilakukan, didapatkan nilai *specific energy absorber* (SEA) maksimum yaitu BBT 4 tebal 1.8 mm dengan 67.022 J/g dan *specific energy absorber* (SEA) minimum yaitu BBT 2 dengan nilai 61.283 J/g.

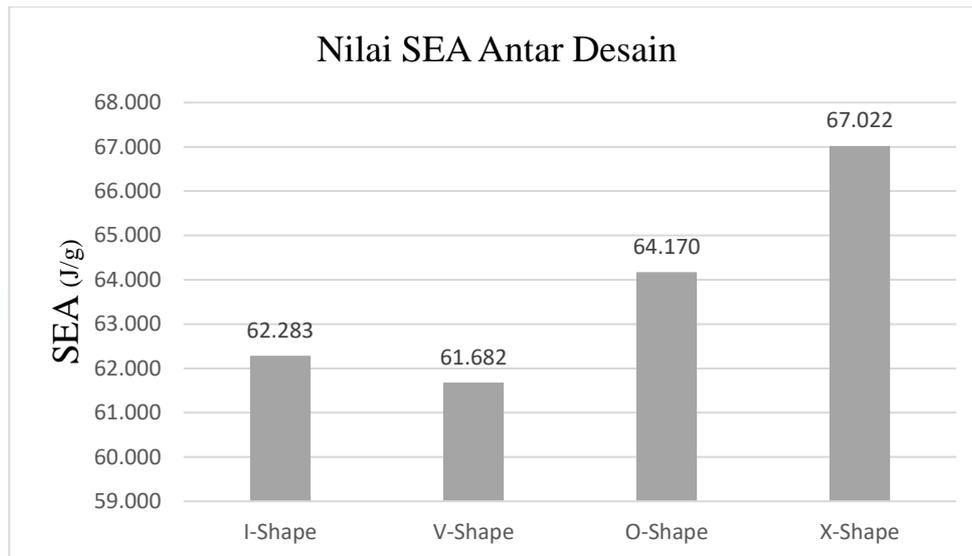
Selanjutnya pada **Gambar 6** menunjukkan hasil simulasi berupa grafik *Force* dan *Displacement* pada masing masing desain, hal ini menunjukkan setiap langkah dari *crushing behavior* akibat dari *axial loading* serta menunjukkan *buckling effect* akibat terjadinya *folding*.





Gambar 6 Grafik Hasil Eksperimen

Pada **Gambar 6** notasi (a) adalah desain BBT 1 dengan *rib* (*I-Shape*) dengan tebal 1.8 mm, memiliki nilai *SEA* 62.283 J/g , serta memiliki bentuk lipatan *local bending* yang disebabkan geometri *rib* yang saling tumpang tindih. Pada notasi (b) desain dengan nilai *SEA* tertinggi adalah BBT 2 dengan ketebalan 2 mm, memiliki nilai *SEA* 61.682 J/g, serta memiliki bentuk *buckling Axisymmetric* pada inner dan outer layer. Pada notasi (c) desain dengan nilai *SEA* tertinggi adalah BBT 3 dengan ketebalan 1.8 mm, memiliki nilai *SEA* 64.170 J/g, serta memiliki bentuk *buckling Non-Axisymmetric* dikarenakan adanya *tension fold* pada saat *initial force* terjadi. Pada notasi (d) desain dengan nilai *SEA* tertinggi adalah BBT 4 dengan ketebalan 1.8 mm, memiliki nilai *SEA* 67.022 J/g, serta memiliki bentuk *buckling Axisymmetric* pada *inner layer* namun pada *outer* terjadi *buckling parsial* yang disebabkan oleh ketebalan dan geometri yang saling berhimpit.



Gambar 7 Grafik perbandingan nilai *SEA* antar desain

Pada **Gambar 7** menunjukkan grafik perbandingan nilai *SEA* antar desain. Tabung BBT4 dengan pattern (*X-Shape*) dengan nilai *SEA* 67.022 J/g dan massa 186 gram dipilih menjadi desain terbaik dengan kriteria *SEA* tertinggi serta bentuk *buckling* yang *Axisymmetric*, dengan adanya data nilai *SEA* dan *S/N Ratio* semakin meyakinkan bahwa dalam eksperimen ini semakin tinggi nilai *SEA* berpeluang untuk mengurangi cedera serius.

4. KESIMPULAN

Dalam eksperimen ini, desain konfigurasi struktur *Bionic Bamboo Tube* dibuat untuk meningkatkan nilai *SEA* dan menyelidik desain *crashworthiness* yang layak. Dengan bentuk *rib* yang semakin kompleks menambah massa dari model tersebut hal ini didasari pada kasus BBT 3 dengan bentuk geometri O pada inti model yang menambah berat massa serta saat awal *axial loading* memiliki *initial peak force* yang tinggi, hal ini beresiko pada penumpang saat deformasi awal. Dalam simulasi numerik dihasilkan desain BBT 4 dengan bentuk *rib* (*X-Shape*) dengan nilai *SEA* tertinggi yaitu 67.022 J/g dengan massa berat 186 gram, serta hasil *Buckling* yang berbentuk *Axisymmetric* dan grafik yang konstan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Verma D, Senal I. Natural fiber-reinforced polymer composites [Internet]. *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy: Construction, Biomedical, and other Industrial Applications*. Elsevier Ltd; 2019. 103–122 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-102426-3.00006-0>
- [2] Hu D, Wang Y, Song B, Dang L, Zhang Z. Energy-absorption characteristics of a bionic honeycomb tubular nested structure inspired by bamboo under axial crushing. *Compos Part B Eng* [Internet]. 2019;162(October 2018):21–32. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.095>
- [3] Abramowicz W, Jones N. Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. *Int J Impact Eng*. 1986;4(4):243–70.
- [4] Nia AA, Hamedani JH. Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries. *Thin-Walled Struct* [Internet]. 2010;48(12):946–54. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2010.07.003>
- [5] Zhang X, Zhang H. Thin-Walled Structures Energy absorption of multi-cell stub columns under axial compression. *Thin Walled Struct* [Internet]. 2013;68:156–63. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2013.03.014>
- [6] M. Versos CA, A. D. Biologically Inspired Design: Methods and Validation. *Ind Des - New Front*. 2011;(May).
- [7] Chen BC, Zou M, Liu GM, Song JF, Wang HX. Experimental study on energy absorption of bionic tubes inspired by bamboo structures under axial crushing. *Int J Impact Eng* [Internet]. 2018;115(January):48–57. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.01.005>
- [8] Wu S, Zheng G, Sun G, Liu Q, Li G, Li Q. International Journal of Impact Engineering On design of multi-cell thin-wall structures for crashworthiness. *Int J Impact Eng* [Internet]. 2016;88:102–17. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.09.003>
- [9] Estrada Q, Szwedowicz D, Rodriguez-Mendez A, Gómez-Vargas OA, Elias-Espinosa M, Silva-Aceves J. Energy absorption performance of concentric and multi-cell profiles involving damage evolution criteria. *Thin-Walled Struct* [Internet]. 2018;124(June 2017):218–34. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.12.013>
- [10] Marsolek J, Reimerdes HG. Energy absorption of metallic cylindrical shells with induced non-axisymmetric folding patterns. *Int J Impact Eng*. 2004;30(8–9):1209–23.