

## **FINITE ELEMENT ANALYSIS CRASHWORTHINESS UNTUK MENENTUKAN SPECIFIC ENERGY ABSORBER PADA THIN-WALLED BIONIC-SPIDER WEB**

### **FINITE ELEMENT ANALYSIS CRASHWORTHINESS TO DETERMINE SPECIFIC ENERGY ABSORBER ON THIN-WALLED BIONIC-SPIDER WEB**

Bela Pitria Hakim<sup>1</sup>, Rino Andias Anugraha<sup>2</sup>, Teddy Sjafrizal<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Prodi S1 Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Telkom

<sup>1</sup>[belahakim@student.telkomuniversity.ac.id](mailto:belahakim@student.telkomuniversity.ac.id), <sup>2</sup>[rinoandias@telkomuniversity.ac.id](mailto:rinoandias@telkomuniversity.ac.id),

<sup>3</sup>[teddysjafrizal@telkomuniversity.ac.id](mailto:teddysjafrizal@telkomuniversity.ac.id)

#### **Abstrak**

Inovasi dalam perkembangan teknologi, terutama pada kendaraan dimana kerangkanya membutuhkan struktur yang ringan dan penyerapan energi lebih besar. Desain tabung struktur *bionic* berupa jaring laba-laba dengan konsep biomimikri yang didapat dengan mempelajari teori atau konsep yang berada di alam, menyelidiki kehidupan, kondisi, dan adaptasi. Jaring laba-laba akan dipilih sebagai konsep alami untuk di analisis pada struktur tabung. Fungsi yang paling baik adalah bagaimana laba-laba bisa membuat jaringnya tersebut dengan pola hexagonal yang akan membantu mereka bertahan hidup. Pengujian dan pemodelan dilaksanakan dengan dasar perbandingan kolom *single-sel* dengan multisel. Tujuannya untuk mengetahui hasil simulasi pada *specific energy absorber* tabung, Metode Elemen Berhingga atau *Finite Element Method* merupakan sebuah metode yang dapat memecahkan masalah *engineering* seperti dalam ruang lingkup *Specific Energy Absorber*, dengan terdapat tiga jenis bionic struktur berdinding tipis menggunakan elemen hingga melalui software Simulia Abaqus. Dari hasil numerik, dapat ditemukan bahwa jumlah sel dan ketebalan berpengaruh terhadap nilai dari *Specific Energy Absorber*. Simulasi yang dilakukan pada objek adalah eksplisit dinamik yang dilakukan untuk melihat penyerapan energi struktur bionik. Sehingga data yang dihasilkan dapat berfungsi untuk memvalidasi *finite element model*.

**Kata kunci:** penyerapan energi, biomimikri, metode taguchi, *finite element method*, ANOVA.

#### **Abstract**

*Innovations in technology development, especially in vehicles where a lightweight framework and greater energy are needed. The tube design of bionic structures that produce spiders with the concept of biomimicry is obtained by theories or concepts that exist in nature, discussing life, conditions, and adaptation. The spider's web will be chosen as a natural concept for analysis on tube structures. The best function of making a profit is to generate profits with a hexagonal pattern that will help them survive. Testing and modeling are based on a comparison of single-cell columns with multicellular. The aim is to study the simulation results on specific energy absorber tubes, Finite Element Method or Finite Element Method (FEM) is a method that can solve technical problems such as in the Specific Energy Absorber distribution, using three types of walled bionic structures using elements using Simulia Abaqus software. From numerical results, we can find the number of cells and thickness of the Specific Energy Absorbent value. In studies, finite element models use explicit dynamics. Simulations performed on objects are dynamic ones which are conducted to see the energy inspiration of bionic structures. The resulting data model can be used to validate the finite element model.*

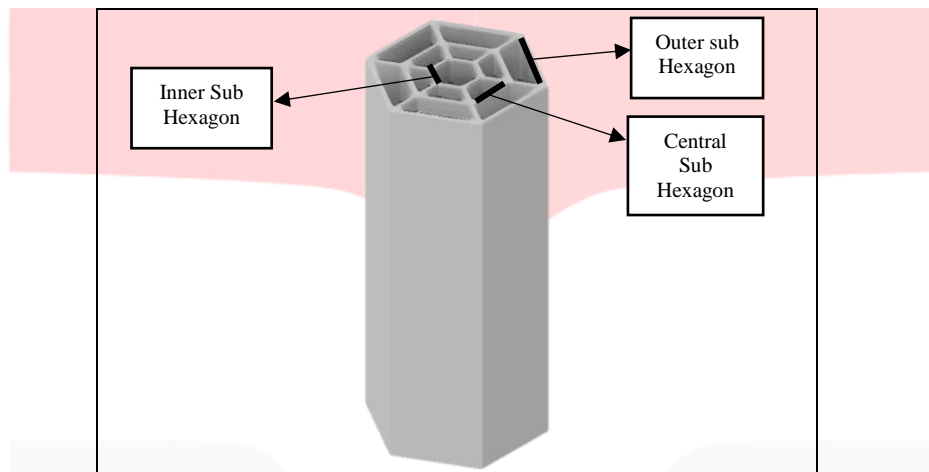
**Keywords:** energy absorption, biomimicry, taguchi method, *finite element method*, ANOVA.

#### **1. Pendahuluan**

Dalam industri manufaktur, struktur kerangka mobil berdinding tipis secara ekstensif diterapkan menjadi komponen kendaraan, dimana kerangkanya membutuhkan struktur yang ringan dan penyerapan energi yang besar. Tujuannya untuk memberikan perlindungan kecelakaan [1], struktur tersebut sangat banyak digunakan dalam dunia industri antara lain otomotif, penerbangan, pelayaran dan konstruksi. Energi yang dihasilkan dapat terserap melalui struktur ringan saat terjadi kerusakan [2], *Crashworthiness* adalah aspek penting pada sebuah konsep design khususnya otomotif, Ketika kendaraan mengalami kecelakaan, bagian-bagian dari kendaraan akan mengalami deformasi plastis dan menyerap banyak energi. Struktur bagian pada kendaraan dirancang sedemikian rupa untuk meningkatkan kapasitas penyerapan energi, yang bertujuan untuk meningkatkan keselamatan pengemudi dan ketangguhan kendaraan.

Tabung multi-sel dapat menyerap energi lebih besar dibandingkan dengan tabung biasa [3], dan untuk menganalisa tabung multi-sel dilakukan juga analisa teori *feasibility of theoretical model* yang divalidasi menggunakan metode numerik mengenai pengembangan formula dan evaluasi efek geometri pada parameter dalam system penyerapan energi [4]. Dalam *crashworthiness* yang melibatkan terjadinya deformasi dan proses penyerapan energi pada kerangka mobil dibutuhkan dalam sepersekian detik, sehingga dibutuhkan struktur komponen penyerapan yang tinggi, dengan itu pemanfaatan material yang digunakan harus lebih kuat untuk menghindari dampak terjadinya kecelakaan.

Aluminium menjadi pilihan karena mampu untuk digunakan pada suku cadang otomotif [5], terutama material *aluminium alloy AA6061* karena memiliki berat yang ringan. Selain itu material tersebut dapat dikembangkan pada proses pembuatan, desain struktur, dan analisis kelayakan. Maka perlu adanya simulasi dan eksperimen *crashworthiness* pada *aluminium alloy* struktur tabung-multi sel yang memiliki bentuk hexagonal seperti jaring laba-laba sebagai penyerapan energi, pengujian eksperimental dan pemodelan dilakukan untuk mengetahui efek dan bentuk geometris pada *crashworthiness* seperti pada gambar 1.



Gambar 1 Desain Struktur Hexagonal




Pada multi-sel ini parameter yang penting adalah desain dan ketebalan [1], eksperimen dilakukan untuk mengetahui gaya yang terminimalisir saat terjadi *crashworthiness* untuk mencegah deformasi. Penyerapan energi dibutuhkan saat deformasi untuk mencegah kerusakan pada bagian-bagian penting dari suatu struktur [6]. Tabung multisel yang terbuat dari aluminium dengan bentuk berupa hexagonal mengalami pembebanan kuasi-statis, Sehingga bisa didapatkan hasil eksperimen kemudian dibandingkan dengan simulasi yang dilakukan. Kapasitas penyerapan energi bagian multisel lebih besar daripada *single structure* [5], dikarenakan bagian heksagonal dalam konfigurasi multi-sel menyerap jumlah energi terbesar per unit massa.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Terdapat pembuktian menyatakan bahwa desain bionic struktur fractal memberikan peningkatan yang signifikan dalam kemampuan penyerapan energi struktur hexagonal jaring laba-laba [7]. Model konsep menjelaskan tujuan dalam studi yang dilaksanakan untuk mendapat hasil simulasi. Pada gambar 2 Input dari proses experiment ini adalah parameter berupa desain dan ketebalan yang nilainya sudah ditentukan dan bisa dirubah sesuai kebutuhan eksperimen, terdapat variable yang berupa *inner sub-hexagon*, *central sub-hexagon* dan *outer sub-hexagon* yang nilai nya dibiarkan tetap selama experiment, dan pengaruhnya di abaikan sehingga disebut variable kontrol. Dengan perancangan experimen *finite element method* menggunakan perangkat lunak *simulia Abaqus* sehingga menghasilkan output berupa nilai force dan *displacement* yang nantinya diolah menjadi nilai *specific energy absorber (SEA)*.

Langkah pertama pada proses pengolahan data adalah mengidentifikasi faktor dan *level* yang akan digunakan pada saat melakukan eksperimen simulasi untuk mengetahui respon pada bagian struktur tabung yang dilihat dari nilai *energy absorber*. Pemilihan jumlah *level* berbanding lurus terhadap hasil simulasi. Semakin banyak *level* yang diteliti, maka semakin teliti pula hasil dari penelitian.

Tabel 1 Parameter

Faktor	Deskripsi	Level 1	Level 2	Level 3
A	Jenis Tube	 HS1	 HS2	 HS3
B	Ketebalan Tube (mm)	2	2	2

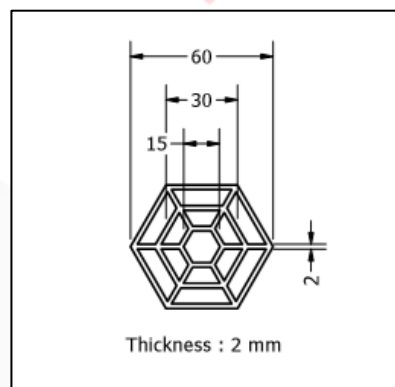
Material dari struktur bionik adalah paduan aluminium AA6061 karena dapat dikembangkan pada proses pembuatan, desain struktur, dan analisis kelayakan. Aluminium alloy AA6061 ini juga menjadi material yang mampu dan akurat untuk dilakukan identifikasi secara koefisien. Material tersebut dipilih karena memiliki sifat mekanik seperti berikut [5]:

Sifat Mekanik	Ukuran
<i>density</i> $\rho$	2700kg / m <sup>3</sup>
<i>Young modulus</i> $E$	68.2 GPa
<i>Poisson ratio</i> $\mu$	0,3.

Dalam semua bahan, yang melakukan perlawanan terbaik saat dilakukan pengujian adalah AA6061 dengan 10% TiAl diperoleh dengan teknik pemadatan cepat oleh fakta yang terjadi reaksi antar muka antara partikel dan matriks. Paduan aluminium AA6061, dengan kandungan magnesium rendah dan tinggi, digunakan sebagai matriks logam dan komposisi kimianya ditunjukkan pada tabel. Paduan ini dibuat menggunakan teknik atomisasi oleh ALPOCO atau England Company [8].

### 2.1 Design Consideration

Biomimikri adalah ilmu terapan yang didapat dengan mempelajari teori atau konsep yang berada di alam, menyelidiki kehidupan, kondisi, dan adaptasi, dalam kasus ini jaring laba-laba akan dipilih sebagai konsep alami untuk di analisis pada struktur tabung multi sel hexagonal yang diadaptasi konsepnya dari bentuk jaring laba-laba, fungsi yang paling baik dalam laba-laba adalah bagaimana laba-laba bisa membuat jaringnya tersebut dengan pola hexagonal yang akan membantu mereka bertahan hidup seperti pada gambar 3 mengenai struktur jaring laba-laba [9].



Gambar 2 Desain Geometri

Berdasarkan tabel 4, pada penyerapan energi geometri dibuat diameter lingkaran yang dibatasi 60 mm, panjang adalah 160mm dan ketebalan dinding akan bervariasi. Kolom akan dimuat secara aksial oleh pengujian kuasi statik dengan massa 500 kg pada kecepatan  $v = 10 \text{ m/s}$ .

<i>Struktur Geometri</i>	
Diameter (D)	60mm
Panjang (L)	160mm
Beban yang diberikan pengujian kuasi-statik	500 Kg
Kecepatan (v)	10 m/s.

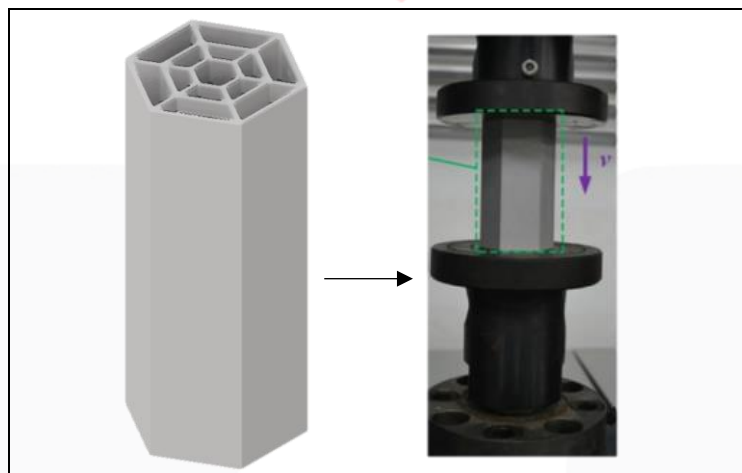
Struktur tabung multisel merupakan *thin walled* dengan struktur sel yang lebih banyak, untuk menganalisis multisel ini telah dilakukan eksperimen, analisis dan numerik yang digunakan untuk mempelajari kapasitas penyerapan energi. Kolom multisel jauh lebih efisien dalam penyerapan energi [5]. Dengan melakukan analisis mengenai mekanisme *crashworthiness* dari tabung hexagonal berdinding tipis. Struktur hexagonal berdasarkan prinsip multisel fraktal di mana bentuknya berupa hexagonal dengan menambahkan segi enam ditengah tengah struktur sampai dua atau tiga sel. Penyerapan energi tersebut mengungguli berbagai multi struktur sel dengan massa yang sama [8].

## 2.2 Finite Element Modeling

### 2.3.1 Perancangan Model Komponen

Pemodelan dan penggunaan simulasi dalam sebuah studi dianggap mampu mengatasi kendala dan permasalahan penelitian seperti kebergantungan kondisi lingkungan, terbatasnya alat eksperimen dan faktor lainnya. Terlebih jika objek studi sulit untuk dianalisis secara manual atau diterapkan perubahan untuk dianalisis lebih lanjut [10]. Pendekatan simulasi diawali dengan pembangunan model sistem nyata. Model tersebut harus dapat menunjukkan bagaimana berbagai komponen dalam sistem saling berinteraksi sehingga benar-benar menggambarkan perilaku sistem. Setelah model dibuat, maka model tersebut ditransformasikan ke dalam program komputer sehingga memungkinkan untuk disimulasikan. Dalam simulasi digunakan komputer untuk mempelajari sistem secara numerik, dimana dilakukan pengumpulan data untuk melakukan estimasi statistik untuk mendapatkan karakteristik asli dari system seperti pada gambar 4. Model didefinisikan sebagai suatu deskripsi logis tentang bagaimana sistem bekerja atau komponen-komponen berinteraksi. Dengan membuat model dari suatu sistem maka diharapkan dapat lebih mudah untuk melakukan analisis. Hal ini merupakan prinsip pemodelan, yaitu bahwa pemodelan bertujuan untuk mempermudah analisis dan pengembangannya. Melakukan pemodelan adalah suatu cara untuk mempelajari sistem dan model itu sendiri dan juga bermacam-macam perbedaannya.







Metode Elemen Berhingga atau *Finite Element Method* (FEM) merupakan sebuah metode yang dapat memecahkan masalah *engineering* seperti dalam ruang lingkup *displacement* dan *force*. Perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi yang berupa prediksi harus mengkonfirmasi bahwa model FE telah menghasilkan karakteristik deformasi pada *displacement* saat dilakukan *crushing*. Hasil eksperimen memberikan bukti lebih lanjut bahwa struktur ber dinding tipis mengalami stabil dan deformasi progresif [5]. Maka dari itu hasil simulasi sesuai dengan hasil experiment. Karena itu, FE Model telah divalidasi dan dapat diterapkan untuk mengevaluasi *crashworthiness* dari desain baru.






Gambar 3 Uji Kuasi-Statik

Pada gambar 5, ditunjukkan uji tekan statis dilakukan dalam mesin uji dengan tabung yang ditempatkan di antara dua plat datar. Selama tes, bagian atas pelat mesin bergerak ke bawah dengan kecepatan konstan 10 m/s. Ketika *displacement* tekan mencapai 70 mm untuk struktur tersebut tes dihentikan dan tabung diturunkan untuk dilakukan analisis. Berikut merupakan setting simulasi yang digunakan:

Tabel 4 Setting Simulasi

Module	Penjelasan	
 <i>Part</i>		Pada bagian ini membuat part tipe <i>discrete rigid</i> , dan bentuk <i>shell</i> dengan tipe <i>extrusion</i> .
 <i>Property</i>		Pada menu <i>Properties</i> masukan kebutuhan spesifikasi material, didalam modul ini mendefinisikan ketebalan serta permukaan dari part.
 <i>Assembly</i>		Pada menu ini membuat <i>assembly</i> pada bagian part dengan plate bagian atas dan bawah.
 <i>Step</i>		Pada menu <i>step</i> menentukan output apa saja yang akan digunakan didalam simulasi.
 <i>Interaction</i>		Pada menu <i>interaction</i> menentukan hubungan antara plate dengan part, terdapat bagian yang diberi tekanan dan bagian lain yang dijadikan penahan.
 <i>Load</i>		Pada menu <i>load</i> memberikan tekanan pada plate bagian atas sebesar yang dibutuhkan.

Tabel 5 *Setting* Simulasi (Cont.)

Modul	Penjelasan
 <b>Mesh</b>	Pada menu <i>mesh</i> dibuat <i>default</i> atau menggunakan angka yang dibutuhkan untuk mendapatkan visual yang baik.
 <b>Job</b>	Pada menu <i>job</i> merupakan submit untuk semua setting yang sudah dilakukan, <i>job</i> akan menghasilkan tanda bahwa setting simulasi sudah <i>completed</i> , ataupun <i>aborted</i> yang menandakan perlu ada yang diperbaiki.
 <b>Vizualization</b>	Pada menu <i>visualization</i> memberikan tampilan hasil simulasi.

Hasil tes yang dilakukan bergantung kepada setting yang diberikan pada simulasi. Simulasi yang dilaksanakan berupa simulasi proses *buckling* dalam suatu proses uji tekan yang dimodelkan simulasi *explicit dynamic* untuk mengetahui respon akibat pembebanan sebesar 500 kg yang diterima oleh tabung melalui *upperplate* dengan desain yang telah ditentukan. Berikut merupakan set-up simulasi yang dilakukan pada software *Simulia Abaqus*.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Eksperimen

Experimen yang dilaksanakan berupa simulasi proses *buckling* dalam suatu proses uji tekan yang dimodelkan simulasi *explicit dynamic* untuk mengetahui respon akibat pembebanan sebesar 500 kg yang diterima oleh tabung melalui *upperplate* dengan desain yang telah ditentukan.

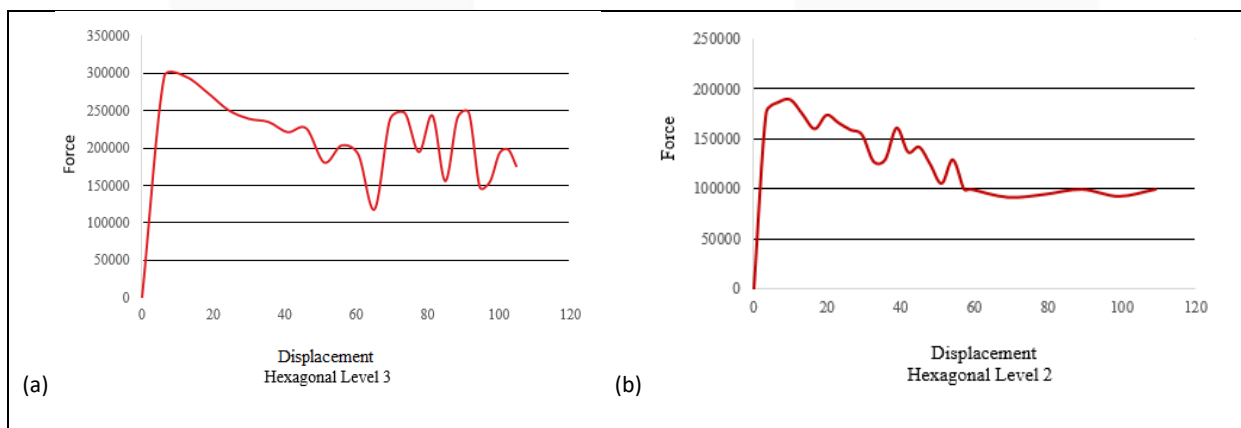
Untuk secara efektif mengevaluasi kinerja dari struktur tabung berdinging tipis, berikut beberapa indikator crashworthiness yang didefinisikan dengan sebuah rumus dari *energy absorbtion* (EA), *specific energy absorbtion* (SEA), *peak crushing force* (PCF), dan *crash load efficiency* (CLE) [7]. Untuk menghitung total energy absorbtion adalah:

$$EA = \int_0^d F(x)dx \dots\dots\dots (1)$$

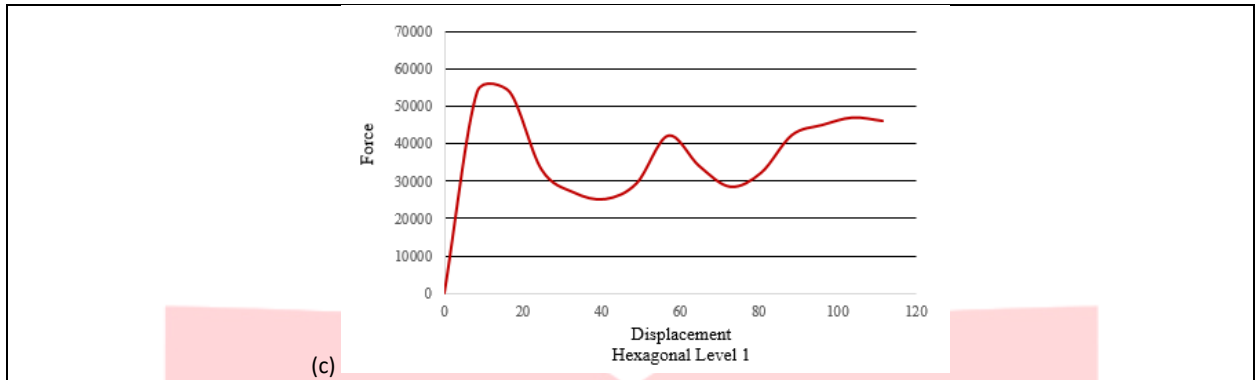
di mana F (x) menunjukkan kekuatan crashworthiness, x adalah *displacement* sesaat, dan d adalah *displacement* yang efektif. Untuk *specific energy absorbtion* (SEA) menunjukkan energi yang diserap oleh struktur dalam satuan massa.

$$SEA = \frac{EA}{M} \dots\dots\dots (2)$$

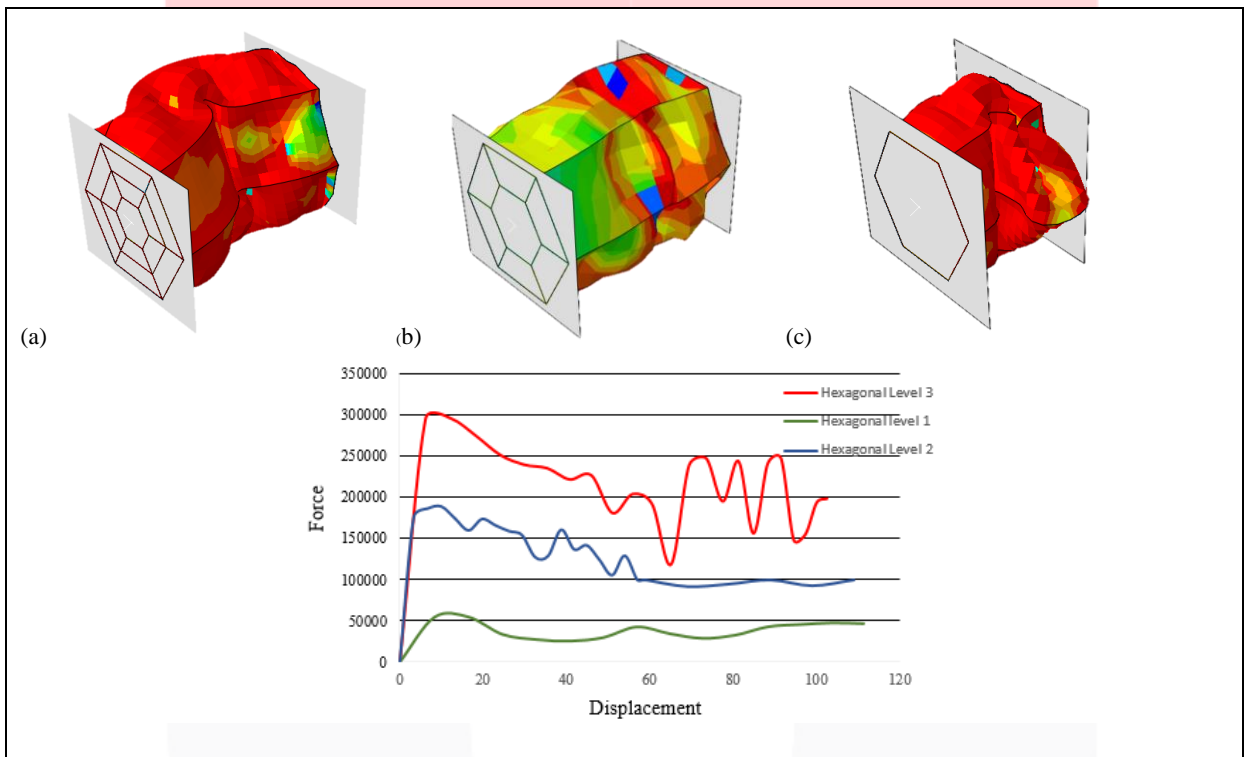
Dimana M adalah total massa dari struktur. SEA merupakan indikator utama untuk menghitung efisiensi penyerapan struktur dengan bahan dan bobot yang berbeda. Sehingga, semakin tinggi SEA, semakin baik kinerja penyerapan energi. Gambar 5 menunjukkan kurva hasil simulasi pada tabung menggunakan software Abaqus CAE. Dari tabel hasil eksperimen yang ditinjau dari nilai *Specific Energy Absorber* (SEA). Dari eksperimen dilihat nilai maximum EA pada HS1 sebesar 3838,44 kJ sedangkan SEA sebesar 15,99 kJ/Kg. Pada desaun HS2 nilai EA sebesar 7936,79 kJ dan nilai SEA sebesar 33,02 kJ/Kg. Pada HS3 nilai EA sebesar 21566.87 kJ dan SEA sebesar 89,86 kJ/Kg.



Gambar 4 Perbandingan hasil simulasi (a) Hexagonal level 3; (b) Hexagonal level 2; (c) Hexagonal level 1

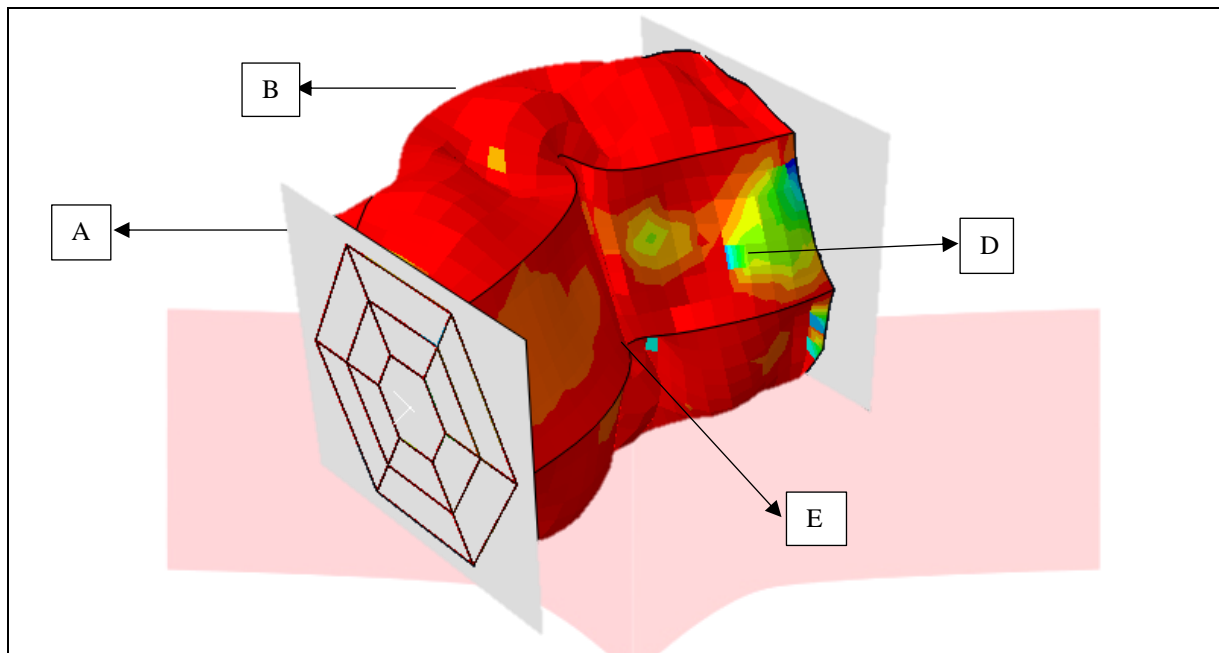


Gambar 5 Perbandingan hasil simulasi (a) Hexagonal level 3; (b) Hexagonal level 2; (c) Hexagonal level 1 (Cont.)



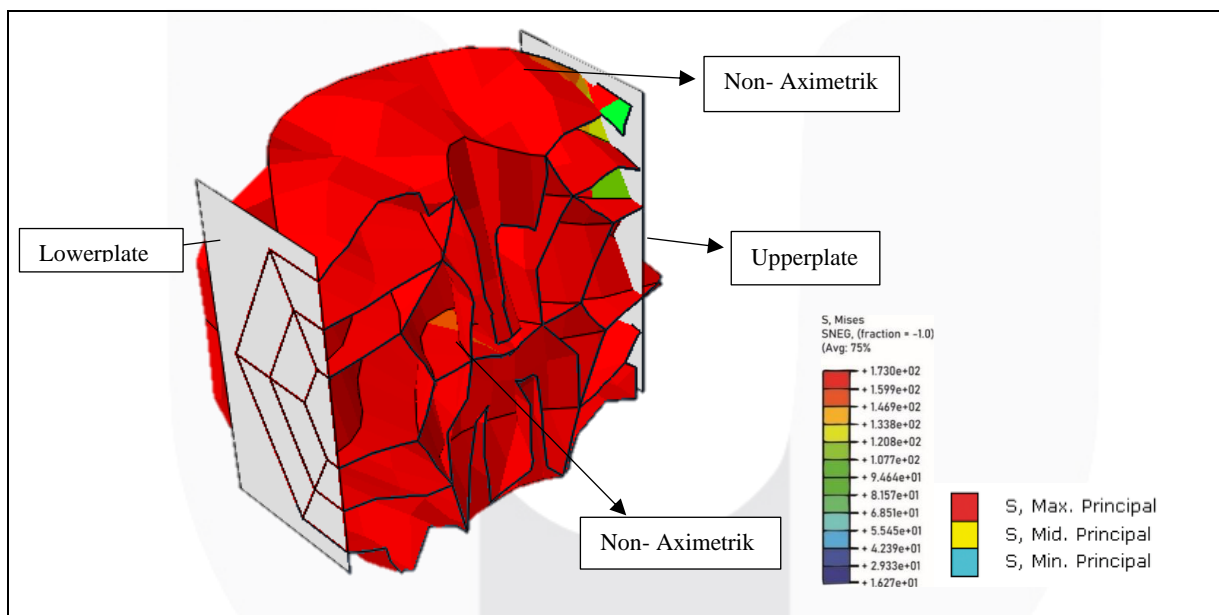
Gambar 6 Model simulasi (a) Hexagonal level 3; (b) Hexagonal level 2; (c) Hexagonal level 1





Gambar 7 Hasil Simulasi Hexagonal Level 3 dengan Ketebalan 2mm

Berikut menunjukkan hasil simulasi berupa tube dari nilai EA maximum yang terjadi dibandingkan dengan Hexagonal level 1 dan Hexagonal level 2, dalam hal ini Hexagonal level 3 memiliki nilai terbesar dengan penyerapan energi terbesar.



Gambar 8 Hasil Pemotongan simulasi HS3 dengan Ketebalan 2mm

Didalam beberapa element, untuk mengetahui distribusi dari hasil yang diberikan dari keseluruhan model, itulah mengapa *integration points* ini diekstrapolasi ke node. Pada data terdapat rata-rata 75% itu merupakan rata-rata yang digunakan untuk mendapatkan nilai tunggal setiap node, hal tersebut berguna untuk mengontrol tingkat rata rata element. Dalam kasus 75% dimana kontribusi yang diperoleh node memiliki nilai yang spesifik, dan ketika nilai node lebih dari 75% kontribusi tersebut tidak di rata-rata, jika kurang atau sama dengan 75% maka node tersebut sudah dilakukan rata-rata, untuk merubah kondisi tersebut Abaqus memiliki opsi dan dapat dilakukan perubahan sesuai dengan yang dibutuhkan dalam analisis. Pada gambar dapat dilihat bahwa kondisi di titik +1.730e+02 berwarna merah tua, kondisi tersebut dapat dijelaskan bahwa titik tersebut adalah *S, Max. Principal* yaitu kondisi terdapat nilai utama terbesar dengan nilai absolut dari semua nilai utama yang dilakukan perbandingan, hal tersebut didasarkan pada *Abaqus CAE User's Manual*.

#### 4. KESIMPULAN

Struktur tabung hexagonal menyerupai jaring laba-laba menjadi jenis baru yang berupa bionic thin walled structure (BTS). Eksperimen dalam studi ini menggunakan konfigurasi yang dilakukan menggunakan metode *finite element* Simulia Abaqus, tujuannya menemukan nilai *specific energy absorber* pada tabung. Berdasarkan hasil perhitungan dan pengolahan data, yang memiliki nilai SEA tertinggi dilihat dari parameter desain aspek *specific energy absorber* (SEA) yaitu desain HS3 dengan ketebalan 2mm. Ketika ingin meningkatkan penyerapan energi maka diperlukan pembuatan desain yang lebih baik, pendesain juga dapat memperhatikan parameter yang dihasilkan, baik itu kolom single sel maupun multisel.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Alavi Nia and M. Parsapour, "Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections," *Thin-Walled Struct.*, vol. 74, pp. 155–165, 2014.
- [2] W. Abramowicz and N. Jones, "Dynamic Progressive Buckling of Circular Square Tubes w.," vol. 4, no. 4, pp. 243–270, 1986.
- [3] W. Chen and T. Wierzbicki, "Relative merits of single-cell, multi-cell and foam-filled thin-walled structures in energy absorption," *Thin-Walled Struct.*, vol. 39, no. 4, pp. 287–306, 2001.
- [4] A. Mahmoodi, M. H. Shojaeefard, and H. Saeidi Gooarchin, "Theoretical development and numerical investigation on energy absorption behavior of tapered multi-cell tubes," *Thin-Walled Struct.*, vol. 102, pp. 98–110, 2016.
- [5] Y. Zhang, N. He, X. Song, T. Chen, and H. Chen, "Thin-Walled Structures On impacting mechanical behaviors of side fractal structures," *Thin-Walled Struct.*, no. October, p. 106490, 2019.
- [6] R. M. Faizal, R. A. Anugraha, T. Sjafrizal, F. Teknik, and U. Telkom, "Optimasi Crashworthiness Desain Geometri Struktur Tabung Berdinding Tipis Pada Crash Tube di Utility Task Vehicle Dengan Metode Permukaan Respon Crashworthiness."
- [7] Y. Zhang, J. Wang, C. Wang, Y. Zeng, and T. Chen, "Crashworthiness of bionic fractal hierarchical structures," *Mater. Des.*, vol. 158, pp. 147–159, 2018.
- [8] C. E. Da Costa, L. De Aguiar, and V. A. Borras, "Properties of AA6061 aluminum alloy reinforced with different intermetallics and ceramics particles," *Mater. Sci. Forum*, vol. 530–531, pp. 255–260, 2006.
- [9] S. B. Nazzal, H. Taleb, and A. Assistant, "Biomimicry : Spiders Natural Concept in Sustainable Built," no. January, pp. 17–19, 2016.
- [10] A. Maria, "Introduction to modeling and simulation," in *Proceedings of the 29th conference on Winter simulation - WSC '97*, 1997.