

## DESAIN SAMBUNGAN YANG TERINSPIRASI DARI KULIT ARMADILLO UNTUK MENINGKATKAN DEFORMASI

Muhammad Albin Abdiyar<sup>1\*</sup>, Yanuar Reza Trie Cahyono<sup>2</sup>, Rafli Adi Ramadhan<sup>3</sup>,  
Muhamad Rayhan Rizky Perdana<sup>4</sup>, Riduwan Prasetya<sup>5</sup>, Andoko<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang  
Jl. Semarang No.5, Sumber Sari, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65145

<sup>5</sup>Program Studi S2 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang  
Jl. Semarang No.5, Sumber Sari, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65145

<sup>6</sup>Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang  
Jl. Semarang No.5, Sumber Sari, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65145

\*Corresponding author: [muhammad.albin.2105146@students.um.ac.id](mailto:muhammad.albin.2105146@students.um.ac.id)

### Abstract

*Bio-inspired are natural design principles used in building engineering models to solve challenges in the field of engineering, especially joints. A joint is made up of several elements or structures that are combined using a special method. One type of joint is a compliant joint, this type of joint requires a high level of deformation according to its use. The deformation value of compliant joints can be increased by applying the bio-inspired concept. The bio-inspired pattern chosen is the empty slit pattern on armadillo skin. The slit pattern of armadillo skin is applied to a compliant joint on a curved surface with the aim of increasing the range of displacement (deformation). The data collection method was carried out by varying the dimensions of the pattern inspired by armadillo skin and the geometric dimensions of the joints to obtain high deformation values that were still within the elastic limit of the material. Simulations were carried out using ANSYS 2023 R2 software to determine the effect of pattern width, pattern length, and joint thickness on the total deformation and maximum stress values. Based on the design simulation results with the highest total deformation results, design 12 with variations in thickness of 2 mm, width of 0.65 mm and pattern height of 11.53 mm has a total deformation value of 11.1630 mm and a maximum stress value of 13.8380 MPa. This simulation succeeded in improving the total deformation value in the design so as to obtain the most optimal joint design.*

**Keywords:** *bio-inspired; armadillo; compliant joint; deformation.*

### Abstrak

*Bio-inspired merupakan prinsip-prinsip desain alam dalam membangun model rekayasa untuk memecahkan tantangan pada bidang teknik, khususnya sambungan. Sambungan merupakan beberapa elemen atau struktur yang digabungkan dengan metode khusus. Salah satu jenis sambungan yaitu compliant joint, sambungan ini merupakan jenis sambungan yang memerlukan tingkat deformasi yang tinggi sesuai dengan penggunaannya. Nilai deformasi pada sambungan compliant joint dapat ditingkatkan dengan menerapkan konsep bio-inspired. Bio-inspired yang dipilih adalah pola celah kosong pada kulit armadillo, pola celah kulit armadillo diterapkan pada sambungan (compliant joint) dipermukaan yang melengkung bertujuan meningkatkan jangkauan perpindahan (deformasi). Metode pengambilan data dilakukan dengan memvariasikan dimensi pola yang terinspirasi kulit armadillo serta dimensi geometri sambungan untuk mendapatkan nilai deformasi yang tinggi namun tetap berada di batas elastis material. Simulasi dilakukan menggunakan software ANSYS 2023 R2 untuk mengetahui pengaruh lebar pola, panjang pola, serta ketebalan sambungan terhadap nilai total deformation dan maximum stress. Berdasarkan hasil simulasi desain dengan hasil total deformation paling tinggi adalah desain 12 pada variasi tebal 2 mm, lebar 0,65 mm dan tinggi pola 11,53 mm dengan nilai total deformation sebesar 11,1630 mm dan nilai maximum stress sebesar 13,8380 MPa. Simulasi ini berhasil memperbaiki nilai total deformation pada desain sehingga mendapatkan desain sambungan yang paling optimal.*

**Kata kunci:** *bio-inspired; armadillo; compliant joint; deformasi.*

## 1. Pendahuluan

Alam merupakan salah satu opsi yang dapat dipertimbangkan untuk memperoleh solusi yang optimal pada suatu permasalahan. Alam dapat dijadikan

inspirasi serta dapat meningkatkan kreativitas untuk menyelesaikan beberapa tantangan, khususnya dalam bidang teknik. Pendekatan alam yang bertujuan untuk mengadaptasi keistimewaan desain alam disebut dengan biomimikri ataupun bio-

*inspired*. Biomimikri merupakan metode penyelesaian masalah dengan menduplikasi desain, proses dan perilaku makhluk hidup di alam [1]. *Bio-inspired* merupakan prinsip-prinsip desain alam dalam membangun model rekayasa yang sangat kompleks dan canggih pada berbagai skala dan memanfaatkan kekayaan pengetahuan untuk memecahkan tantangan kritis khususnya dalam bidang teknik [2]. Biomimikri sering disandingkan dengan *bio-inspired* karena merujuk konsep yang serupa, dengan kata lain biomimikri merupakan bentuk *bio-inspired* yang lebih spesifik dalam meniru dan menerapkan desain alam. Keuntungan yang didapat dari *bio-inspired* salah satunya adalah untuk mengatur tingkat kekakuan serta deformasi untuk bergerak secara efisien [3]. *Bio-inspired* dapat diterapkan pada sebuah komponen, salah satunya sambungan yang mengadaptasi pola kulit armadillo.

Sambungan merupakan beberapa elemen atau struktur yang digabungkan dengan metode khusus. Sambungan merupakan hasil dari penyatuan beberapa bagian atau konstruksi dengan menggunakan suatu cara tertentu [4]. Sambungan memiliki peran penting dalam bidang teknik. Elemen sambungan menjadi faktor untuk menentukan kemampuan struktur untuk menahan beban [5]. Kriteria sambungan yang digunakan pada setiap struktur mempertimbangkan kondisi dalam penggunaannya, hal ini agar mendapatkan kriteria sambungan yang tepat untuk kondisi penggunaannya

Sambungan (*compliant joint*) memerlukan tingkat jangkauan perpindahan (deformasi) yang tinggi sesuai dengan penggunaannya. Deformasi yang baik ditinjau dari berbagai faktor seperti geometri sambungan, dan *mechanical properties* atau sifat mekanik dari material yang digunakan untuk menunjang ketahanan dan kekuatan yang berbeda pada strukturnya [6]. Faktor tersebut perlu dipertimbangkan untuk menciptakan desain sambungan yang sesuai dengan kebutuhan untuk mendapatkan hasil yang optimal ketika beban diterapkan pada

sambungan. Berbagai metode dilakukan untuk mengatasi masalah-masalah pada sambungan saat beban dikenakan pada sambungan.

Geometri sambungan pada permukaan melengkung dapat divariasikan dengan mengadaptasi *bio-inspired* pola celah kosong kulit armadillo untuk mendapatkan tingkat deformasi yang baik, pendistribusian beban yang merata serta pengoptimalan untuk meredam *stress*. Pola celah kulit armadillo diterapkan pada sambungan (*compliant joint*) dipermukaan yang melengkung bertujuan meningkatkan jangkauan perpindahan (deformasi) [7]. Armadillo memiliki pola strip yang unik. Pola strip pada armadillo akan dimodifikasi untuk digunakan pada permukaan melengkung sambungan. Pola ini dapat diterapkan pada sambungan, khususnya sambungan (*compliant joint*) untuk mendapatkan deformasi yang optimal terhadap pembebanan.

Ketebalan pada permukaan melengkung sambungan (*compliant joint*) dapat mempengaruhi deformasi dan kekakuannya. Menurut penelitian Andriawan [5], yang membahas pengaruh variasi tebal geometri terhadap sambungan didapatkan hasil bahwa semakin tebal geometri pada sambungan yang digunakan maka konsentrasi tegangannya semakin kecil. Menurut penelitian Tovar & Urquizo [6], yang membahas tentang pola armadillo, panjang dan lebar dari pola celah kosong armadillo yang menghasilkan celah ruang kosong pada permukaan melengkung dapat mempengaruhi deformasi dan kekakuan yang menurun. Penelitian-penelitian sebelumnya masih berfokus pada ketebalan sambungan, panjang pola, dan lebar pola dengan nilai yang sudah ditetapkan namun belum mengoptimalkan dimensi yang telah dijadikan acuan tersebut.

Metode pengoptimalan parameter dimensi pada lebar pola, panjang pola, serta ketebalannya untuk meningkatkan deformasi dan menurunkan kekakuan pada sambungan (*compliant joint*) yang terinspirasi dari alam (*bio-inspired*).

Pengoptimalan ini menggunakan nilai dari dimensi yang sudah ditetapkan pada parameter awal dengan menambahkan batas nilai atas dan bawah dari dimensinya untuk mendapatkan hasil yang paling optimal [8]. Artikel ini ditulis untuk menyajikan ide atau konsep untuk mengatasi masalah pada sambungan dalam suatu rancangan yang terinspirasi dari alam (*bio-inspired*) dengan mengoptimalkan desain yang telah dibuat.

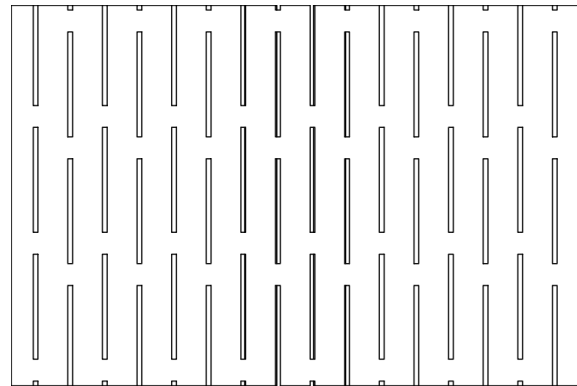
## 2. Metode Penelitian

Pengujian ini menggunakan *finite element analysis* untuk menentukan total *deformation* sambungan dan *maximum stress*. Tahapan pengujian dimulai dari studi literatur tentang *bio-inspired* yang akan diterapkan pada sambungan (*compliant joint*). Tahap selanjutnya mendesain sambungan dan menetapkan dimensi awal dari parameter lebar pola, panjang pola, serta ketebalan sambungan yang akan divariasikan nilai dimensinya. Dimensi dari lebar pola, panjang pola, serta ketebalan sambungan tersebut diberi batas atas dan batas bawah dari nilai yang sudah ditetapkan untuk memperoleh sambungan optimal. Tahapan pengujian meliputi proses mendesain sambungan menggunakan *software* Autodesk Inventor. Material yang digunakan dalam sambungan ini yaitu *Poly Lactid Acid* (PLA). Pengujian ini dilakukan menggunakan *software* ANSYS 2023 R2 *static structural* untuk melakukan simulasi pada sambungan juga digunakan untuk menentukan letak *support*, letak gaya yang diterapkan serta *meshing* yang digunakan. Hasil dari pengujian didapatkan nilai *total deformation* dan *maximum stress* pada sambungan.

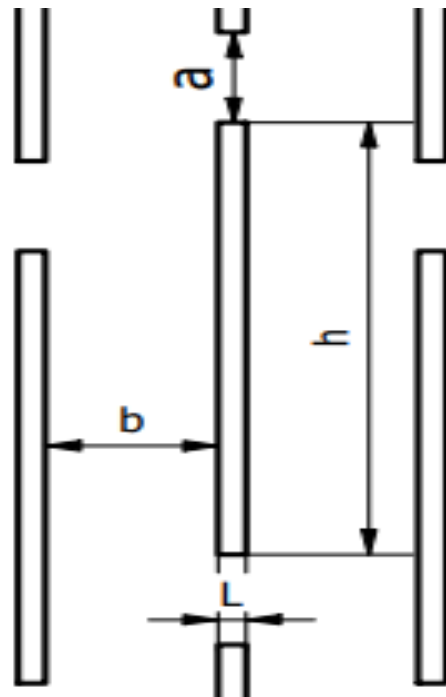
### 2.1 Geometri Sambungan

Geometri sambungan pada pengujian ini meliputi area *fixed support*, permukaan melengkung, dan area beban yang akan diterapkan. Pengujian ini pada desain awal memiliki dimensi panjang pola celah kosong sebesar 11,03 mm, lebar sebesar 0,5 mm, dan tebal pada permukaan

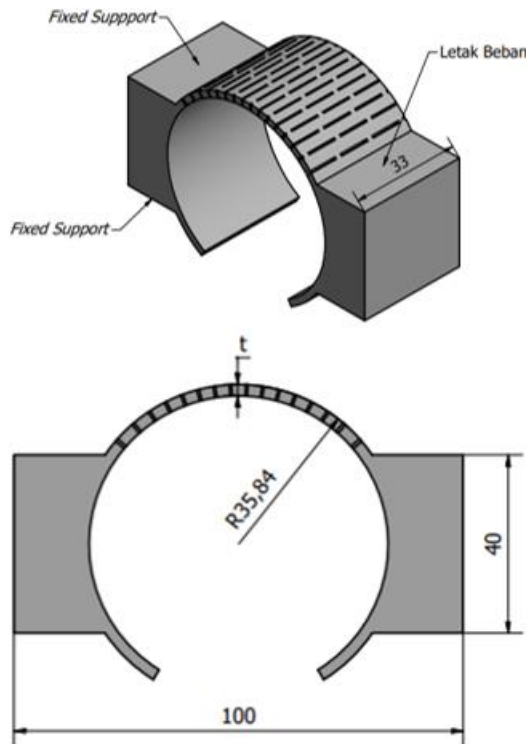
melengkung sebesar 2,5 mm. Dimensi pada desain awal akan di berikan batas atas dan batas bawah untuk memodifikasi parameter yang akan di variasikan masing-masing 0,5 mm, 0,15 mm, dan 0,5 mm yang menghasilkan tiga level. Desain celah kosong yang terinspirasi pola kulit armadillo dapat dilihat pada Gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1. Pola celah kosong pada permukaan melengkung yang terinspirasi kulit armadillo



Gambar 2. Skema dimensi pola celah kosong pada permukaan melengkung yang terinspirasi kulit armadillo



Gambar 3. Skema simulasi serta ketebalan permukaan melengkung

Dimensi dari parameter lebar pola dan panjang pola celah kosong pada desain dilambangkan  $h$  dan  $L$  yang ditunjukkan oleh Gambar 2. Jarak antar pola celah kosong pada sumbu  $x$  dilambangkan  $b$  dan pada sumbu  $y$  dilambangkan oleh  $a$  yang ditunjukkan oleh Gambar 2. Tebal pada sambungan dilambangkan  $t$  ditunjukkan pada Gambar 3. Nilai dimensi pada sambungan ditunjukkan pada Tabel 1 sebagai berikut.

Keterangan	Dimensi (mm)
$b$	3,13 - 3,33
$a$	3,2 - 3,5
$H$	10,53, 11, 03, dan 11,53
$L$	0,35, 0,5, dan 0,65
$t$	2, 2,5, dan 3

Pengujian ini memiliki tiga parameter yang divariasikan yaitu dimensi dari panjang pola celah kosong, lebar pola celah kosong, dan tebal permukaan melengkung pada sambungan yang ditunjukkan Tabel 1. Dimensi pada parameter yang divariasikan ditunjukkan oleh Tabel 2. Variasi dari tiga parameter dan

tiga level tersebut akan menghasilkan 27 desain yang berbeda yang ditunjukkan oleh Tabel 3.

Tabel 2. Parameter dan nilai dimensi setiap levelnya

Level	Lebar Pola (L)	Tinggi Pola (h)	Tebal Sambungan (t)
	(mm)		
1	0,35	10,53	2
2	0,5	11,03	2,5
3	0,65	11,53	3

Tabel 3. Dimensi parameter 27 desain

Desain Sambungan	Lebar Pola (L)	Tinggi Pola (h)	Tebal Sambungan (t)
	(mm)		
1	0,35	10,53	2
2	0,5	11,03	2,5
3	0,65	11,53	3
4	0,5	10,53	2
5	0,5	11,03	2,5
6	0,5	11,53	3
7	0,65	10,53	2
8	0,65	11,03	2,5
9	0,65	11,53	3
10	0,65	10,53	2,5
11	0,65	11,03	3
12	0,65	11,53	2
13	0,35	10,53	2,5
14	0,35	11,03	3
15	0,35	11,53	2
16	0,5	10,53	2,5
17	0,5	11,03	3
18	0,5	11,53	2
19	0,5	10,53	3
20	0,5	11,03	2
21	0,5	11,53	2,5
22	0,65	10,53	3
23	0,65	11,03	2
24	0,65	11,53	2,5
25	0,35	10,53	3
26	0,35	11,03	2
27	0,35	11,53	2,5

## 2.2 Material

Studi mengenai pengujian serupa dilakukan dengan menggunakan material

*Poly Lactid Acid (PLA)*. *Mechanical properties* material PLA yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 4 berikut.

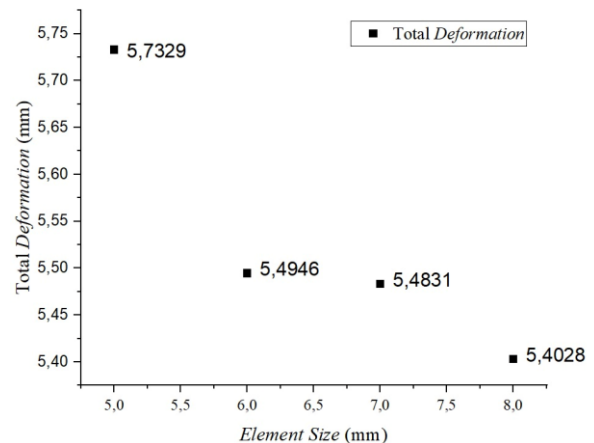
Tabel 4. *Mechanical properties* PLA

<b>PLA Properties</b>	
<i>Density (kg/m<sup>3</sup>)</i>	1250
<i>Coefficient of thermal expansion (1/C)</i>	0,000135
<i>Young's Modulus (Pa)</i>	3,45E+09
<i>Poisson's Ratio</i>	0,813
<i>Bulk Modulus (Pa)</i>	5,2273E+09
<i>Shear Modulus (Pa)</i>	1,241E+09
<i>Tensile Yield Strength (MPa)</i>	54,1
<i>Tensile Ultimate Strength (MPa)</i>	5,92E+07

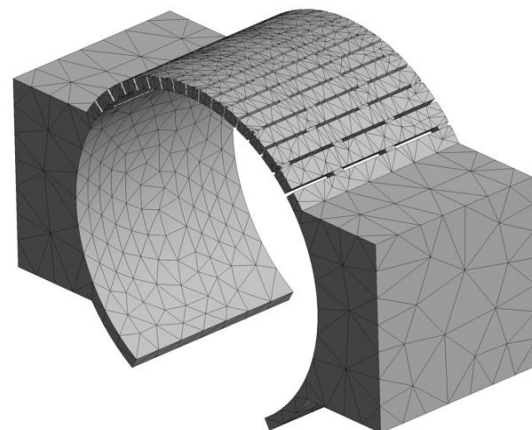
### 2.3 Meshing

*Finite elements analysis* merupakan metode yang digunakan untuk membagi model struktur menjadi bagian yang lebih sederhana untuk menganalisis kondisi suatu model [9]. *Meshing* merupakan langkah awal untuk melakukan simulasi menggunakan *software finite element analysis*. *Meshing* merupakan langkah pembagian geometri ke dalam beberapa entitas kecil yang disebut *mesh*, dengan bentuk khusus dan koneksi antar titik atau node. Ukuran *mesh* dalam analisis elemen hingga (*finite elements analysis*) memiliki keterkaitan dengan akurasi yang dihasilkan dan jumlah *mesh* yang diperlukan [10]. Keterkaitan hasil simulasi pada ukuran *mesh* (*sensivitas mesh*) akan dipertimbangkan untuk memperoleh kesempurnaan *mesh* dan konvergensi *mesh*. Parameter *mesh* yang digunakan dalam simulasi antara lain *adaptive sizing*, elemen order diatur ke opsi *program controlled*, kontrol konvergensi ditetapkan sebagai default, toleransi konvergensi sebesar 1.0E-08, elemen size sebesar 6 mm, dan bentuk elemen *mesh* yang digunakan yaitu *tetrahedrons*. Pengujian ini merupakan penyempurnaan dari proses eksperimental yang telah dilakukan, sehingga parameter yang digunakan sangatlah penting untuk mendapatkan hasil yang optimum, pengujian yang dilakukan secara eksperimental menghasilkan nilai *total deformation* sebesar 5,5 mm [6]. Berdasarkan simulasi dengan ukuran yang

sama didapatkan hasil 5,4946 mm. Error yang didapatkan pada hasil simulasi sebesar 1,78% pada *element size* 6 mm yang ditunjukkan pada Gambar 4. Sambungan yang menggunakan *meshing* 6 mm ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Konvergensi dan validasi *meshing*



Gambar 5. *Meshing* pada Sambungan

### 2.4 Beban

Area beban yang diterapkan pada sambungan ditunjukkan oleh Gambar 3. Pengujian ini digunakan beban sebesar 0,813 N. Menurut Tovar & Urquizo [6], beban yang digunakan ini merupakan beban yang umum dari data beban pengukuran perpindahan (*deformasi*) yang digunakan di laboratorium pengujian.

## 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil dan pembahasan meliputi hasil pengujian *total deformation*, hasil pengujian *maximum stress*, pembahasan pengaruh dari nilai masing-masing yang telah divariasi

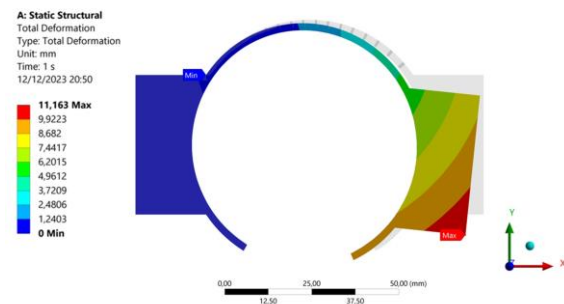
terhadap total *deformation* serta desain yang paling optimal dari 27 desain. Hasil pengujian total *deformation* dan *maximum stress* ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil pengujian pada 27 desain sambungan

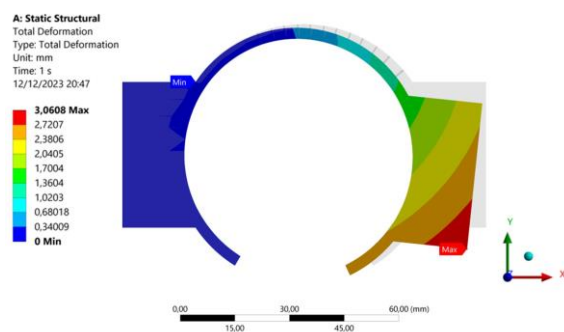
Desain Sambungan	<i>Total Deformation</i>	<i>Maximum Stress</i>
	(mm)	(MPa)
1	8,8300	16,1260
2	5,3349	10,5490
3	3,7357	11,0440
4	8,9489	14,0100
5	5,4946	11,4600
6	3,7916	8,7076
7	9,0006	10,6770
8	5,7184	10,7300
9	3,8760	6,9727
10	5,1709	8,3776
11	3,5403	6,5066
12	11,1630	13,8380
13	4,8719	11,3080
14	3,3279	9,0831
15	10,7720	20,4910
16	5,0239	9,8598
17	3,3873	8,1498
18	11,0520	16,9630
19	3,0950	7,3062
20	9,8353	16,1280
21	6,2048	12,1040
22	3,2130	6,0878
23	9,9415	12,3790
24	6,3097	11,6080
25	3,0608	8,2061
26	9,7014	20,7680
27	5,9978	13,0230

### 3.1 Total Deformation

Pengujian *total deformation* dilakukan pada 27 desain sambungan berbeda yang telah disimulasikan. Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan Tabel 3, nilai *total deformation* yang didapatkan pada 27 desain sambungan yang berbeda memiliki hasil yang berbeda-beda. Nilai *total deformation* tertinggi terjadi pada desain 12 dengan nilai sebesar 11,1630 mm. Nilai *total deformation* terendah terjadi pada desain 25 dengan nilai sebesar 3,0608 mm. Lebar pola, panjang pola, dan ketebalan sambungan mempengaruhi nilai *total deformation* yang diperoleh pada semua sambungan. Gambar hasil simulasi yang didapatkan dengan nilai *total deformation* tertinggi dan terendah ditunjukkan oleh gambar dibawah ini.



Gambar 6. Hasil simulasi total *deformation* desain 12

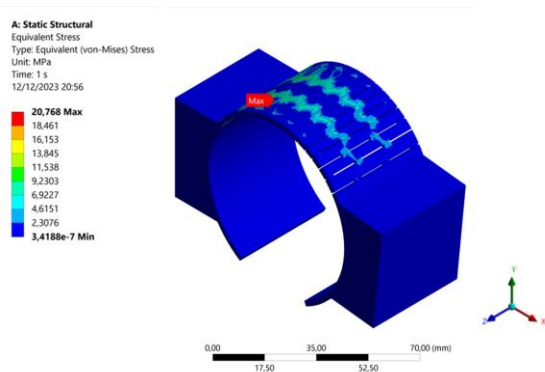


Gambar 7. Hasil simulasi total *deformation* desain 25

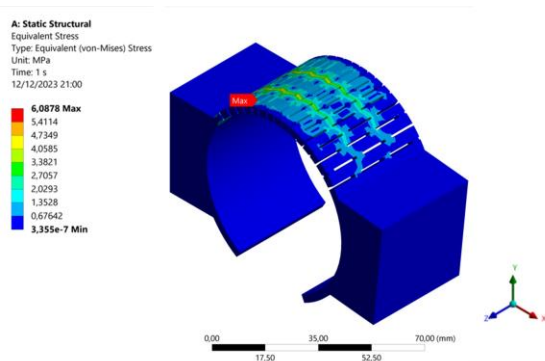
### 3.2 Maximum Stress

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan Tabel 5, nilai *maximum stress* yang didapatkan pada 27 desain sambungan

yang berbeda memiliki hasil yang berbeda-beda. Nilai *maximum stress* tertinggi terjadi pada desain 26 dengan nilai sebesar 20,7680 MPa. Nilai *maximum stress* terendah terjadi pada desain 22 dengan nilai sebesar 6,0878 MPa. Seiring dengan bertambahnya nilai ketebalan didapatkan hasil bahwa nilai *maximum stress* berkurang pada *compliant joint* [11]. Gambar hasil simulasi yang didapatkan dengan nilai *maximum stress* tertinggi dan terendah ditunjukkan oleh gambar dibawah ini.



Gambar 8. Hasil simulasi *maximum stress* desain 26



Gambar 9. Hasil simulasi *maximum stress* desain 22

### 3.3 Pengaruh Dimensi Terhadap Nilai *Total Deformation*

*Compliant joint* memerlukan jangkauan perpindahan (deformasi) yang sesuai dengan penggunaannya. Deformasi yang baik ditinjau dari berbagai faktor seperti geometri sambungan untuk menunjang ketahanan dan kekuatan. Berdasarkan hasil pengujian simulasi *total deformation* yang ditunjukkan pada Tabel 5, didapatkan hasil pada 27 desain sambungan bahwa nilai *total deformation* tertinggi terjadi pada desain 12 sedangkan nilai *total*

*deformation* terendah terjadi pada desain 25. Kombinasi level parameter pada desain 25 yaitu level tiga pada lebar pola, level tiga pada tinggi pola, dan level satu pada tebal sambungan. Lebar pola dan panjang pola yang berada di level maksimum membuat area pola celah kosong semakin tinggi, sehingga luas permukaan semakin kecil, level satu pada parameter tebal membuat luas permukaan pada permukaan melengkung juga semakin rendah. Berdasarkan kombinasi level tiap variabel pada spesimen 12 membuat luas permukaan pada permukaan melengkung semakin rendah sehingga deformasi yang terjadi semakin tinggi. Luas area pembebanan pada struktur berpengaruh pada kekakuan, di mana semakin besar luas area yang menerima pembebanan maka nilai deformasi akan semakin kecil [12]. Ketebalan sambungan juga berpengaruh terhadap deformasi, semakin tebal suatu sambungan maka nilai deformasi semakin kecil [13].

### 3.4 Desain yang Paling Optimal Berdasarkan Nilai *Total Deformation*

*Deformasi* yang baik pada *compliant joint* ditinjau dari berbagai faktor seperti geometri. Hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 5, menunjukkan bahwa desain dengan hasil *total deformation* paling tinggi adalah desain 12 pada variasi tebal 2mm, lebar 0,65 mm dan tinggi pola 11,53 mm dengan *total deformation* sebesar 11,1630 mm dan nilai *maximum stress* sebesar 13,8380 MPa. Berdasarkan hasil simulasi tersebut nilai *maximum stress* pada desain 12 tidak memiliki nilai tertinggi jika dibandingkan dengan 26 desain yang lain pada pengujian *maximum stress*. Pemilihan desain dengan nilai optimal tersebut ditinjau dari tujuan awal pembuatan jenis *compliant joint* yaitu mampu meningkatkan jangkauan perpindahan (*deformasi*) sehingga mampu meredam tegangan dengan mempertimbangkan batas elastisitas material PLA dimana hasil *maximum stress* desain tersebut tidak melewati batas *Tensile*

*Yield Strength*. Hasil *maximum stress* desain yang tidak melewati batas *Tensile Yield Strength* mengindikasikan bahwa tidak ada deformasi plastis yang terjadi dan material akan kembali ke bentuk semula ketika beban dihilangkan [14]. Desain yang optimal memiliki dampak signifikan terhadap pendistribusian tegangan normal dan geser pada suatu sambungan [13].

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini secara singkat meninjau desain dan kombinasi pada *compliant joint* yang terinspirasi dari pola geometri kulit armadillo untuk meningkatkan fleksibilitas dan meningkatkan jangkauan perpindahan (deformasi). Hasil simulasi menunjukkan bahwa desain dengan hasil *total deformation* paling tinggi adalah desain 12 pada variasi tebal 2 mm, lebar pola 0,65 mm serta tinggi pola 11,53 mm dengan *total deformation* sebesar 11,1630 mm dan nilai *maximum stress* sebesar 13,8380 MPa. Ketebalan sambungan, lebar pola, dan tinggi pola mempengaruhi nilai *total deformation* yang dihasilkan. Ketebalan sambungan berbanding terbalik dengan nilai *total deformation* yang dihasilkan sedangkan lebar pola dan tinggi pola berbanding lurus dengan nilai *total deformation* yang dihasilkan. Hasil optimasi menunjukkan bahwa desain yang paling optimal terjadi pada desain 12 karena memiliki nilai *total deformation* yang tinggi dan masih berada pada batas elastisitas pada sambungan yang didasarkan pada nilai *maximum stress*. Simulasi ini berhasil mendapatkan desain yang paling optimal pada desain 12.

#### Referensi

- [1] G. Anandhita, "Biomimikri Gerak Adaptif Tumbuhan Mimosa Sebagai Fasad Kinetik," *Modul*, vol. 20, no. 2, pp. 145–150, 2020, doi: 10.14710/mdl.20.2.2020.145-150.
- [2] R. R. Naik and S. Singamaneni, "Introduction: Bioinspired and Biomimetic Materials," *Chem. Rev.*, vol. 117, no. 20, pp. 12581–12583, 2017, doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00552.
- [3] S. Coyle, C. Majidi, P. LeDuc, and K. J. Hsia, "Bio-inspired soft robotics: Material selection, actuation, and design," *Extrem. Mech. Lett.*, vol. 22, pp. 51–59, 2018, doi: 10.1016/j.eml.2018.05.003.
- [4] N. R. Haryani dan E. Zulaikha, "Eksperimen Sistem Sambungan Tanpa Penggunaan Sekrup dan Baut untuk Display Pameran," *J. Sains Dan Seni Its*, vol. 7, no. 2, 2018.
- [5] M. R. Andriawan, "Analisis Pengaruh Jarak Antar Lubang dan Tebal Plat terhadap Konsentrasi Tegangan pada Plat Beban Tarik Menggunakan Simulasi Statika Struktural," vol. 7, 2023.
- [6] W. Wang, Y. Sun, Y. Lu, J. Wang, Y. Cao, and C. Zhang, "Tensile behavior of bio-inspired hierarchical suture joint with uniform fractal interlocking design," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 113, no. August 2020, p. 104137, 2021, doi: 10.1016/j.jmbbm.2020.104137.
- [7] M. Betancourt-Tovar and E. Cuan-Urquizo, "Increasing displacement range in 3D printed compliant joints via bio-inspired slot patterns: An exploratory study," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 35, 2022, doi: 10.1016/j.jestch.2022.101229.
- [8] F. Rachman, B. W. K. T. A. Setiawan, and P. Nurkholies, "Penerapan Metode Taguchi untuk Optimasi Setting Parameter CNC Milling Terhadap Kekasaran Permukaan Material," *J. Teknol. dan Rekayasa Manufaktur*, vol. 2, no. 2, pp. 109–120, 2020, doi: 10.48182/jtrm.v2i2.70.
- [9] B. Solaeman Pratama, A. Saggaff, and S. Muliawan, "ANALISA BEBAN ULTIMIT STRUKTUR RANGKA ATAP SENTRIS DAN NON SENTRIS MENGGUNAKAN PROFIL BAJA RINGAN." 2019.

- [10] M. G. F. G. Fajrin, H. Widianoro, and Z.- Zainuddin, “Analisis Elemen Hingga Bagian Penekuk pada Mesin Pembuat Begel Baja Tulangan 8 mm,” *Suara Tek. J. Ilm.*, vol. 13, no. 1, p. 6, 2022, doi: 10.29406/stek.v13i1.4222.
- [11] M. S. Pranata, A. Wibawa, B. Santosa, and M. Iqbal, “Perbandingan Kekuatan Tarik dan Kekuatan Kekerasan Las GMAW dan GTAW Terhadap Material Aluminium 6061 Dengan Variasi Arus Pengelasan,” *J. Tek. Perkapalan*, vol. 9, no. 1, p. 59, 2021.
- [12] A. H. Ramadhan, S. A. Widyanto, and A. Widodo, “Simulasi Defleksi Beban Statis Dan Analisis Perilaku Damping Konstruksi Kayu Untuk Pengembangan Bed Mesin Perkakas,” *J. Tek. Mesin*, vol. 2, no. 3, pp. 305–314, 2014.
- [13] R. Puasay *et al.*, “ANALISIS TEORITIS DAN EKSPERIMENTAL DEFLEKSI PADA KAYU DENGAN VARIASI JENIS DAN POSISI PERLETAKAN Rionaldi,” vol. 14, no. 1, pp. 1417–1423, 2023.
- [14] M. N. Rizki, A. Fikri, Faisal, and R. A. Nanda, “Analisis Von-Mises Stress, Strain, Dan Total Deformasi Pada Pelat Implan Metatarsophalangeal (Mtp) Dengan Material Ti-6Al-4V Menggunakan Finite Element Method,” *J. Teknol. Kim. Unimal*, vol. 12, no. 2, p. 178, 2023, doi: 10.29103/jtku.v12i2.12971.
- [15] M. Zhang *et al.*, “Finite element analysis of stress–strain relationship and failure pattern of concrete under uniaxial compression considering freeze–thaw action,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 290, no. May, p. 109520, 2023, doi: 10.1016/j.engfracmech.2023.109520