

ANALISIS GEOMETRI PADA *HIERARCHICAL SUTURE JOINT* YANG TERINSPIRASI DARI DNA RUSA

Muhammad Wahid Darmawan¹, Tegar Imam Rosyadi², Nanda Dwi Laksana³,
Oddy Geo Fernanda⁴, Riduwan Prasetya⁵, Andoko^{6*}

^{1,2,3,4}Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang
Jl. Semarang No.5, Sumber Sari, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65145

⁵Program Studi S2 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang
Jl. Semarang No.5, Sumber Sari, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65145
Jl. Ki Hajar Dewantara 15 A Kota Metro, Lampung, Indonesia

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

*Corresponding author: andoko.ft@um.ac.id

Abstract

Joints are commonly used in constructing frame structures and bridges. Fasteners in structures have varying strength and durability based on different factors, such as joint geometry and material mechanical properties. The aim of this study is to investigate the potential of joints, using hierarchical sutures from deer skulls. Various methods are used to overcome joint problems, such as geometric factors and material mechanical properties, in order to withstand the loads imposed on the structure. The bone geometry of the skull suture, which resembles a triangular shape, is a source of design inspiration in structures, especially joints. Design analysis is carried out using ANSYS simulation with variations in the form of order 1 and order 2, and angle variations of 30°, 45°, and 60° to find the optimal joint design in resisting tegangan and regangan deformations. The simulation results that provide the best design in resisting deformation, tegangan, and regangan are the design with order 1 angle 60° and the design with order 2 angle 60°. The number of orders will affect the mechanical properties and increase the strength of the joint whilst the angle will affect the distribution of forces in the joint.

Keywords: *bio-inspired, hierarchical sutures, FEM (Finite Element Methods)*

Abstrak

Joint umumnya digunakan pada struktur rangka bangunan dan jembatan, pengencang pada struktur memiliki kekuatan dan ketahanan yang berbeda berdasarkan berbagai faktor seperti geometri joint dan sifat mekanik material. Tujuan dari penelitian ini yaitu mengeksplorasi potensi joint dengan menggunakan hierarchical suture dari tengkorak rusa. Berbagai metode digunakan untuk mengatasi permasalahan joint seperti faktor geometrik dan sifat mekanik material agar dapat menahan beban-beban yang dikenakan pada struktur, geometri tulang dari jahitan tengkorak yang menyerupai bentuk segitiga inilah yang menjadi sumber inspirasi desain dalam struktur khususnya joint. Analisis desain dilakukan menggunakan simulasi ANSYS dengan variasi berupa ordo 1 dan ordo 2 serta variasi sudut 30°, 45°, dan 60° guna mencari desain joint yang optimal dalam menahan deformasi tegangan dan regangan. Hasil simulasi yang memberikan desain terbaik dalam menahan deformasi, tegangan, dan regangan yaitu desain dengan ordo 1 sudut 60° dan desain dengan ordo 2 sudut 60°. Jumlah ordo akan mempengaruhi sifat mekanik dan menambah kekuatan joint sedangkan sudut akan mempengaruhi pendistribusian gaya pada joint.

Kata kunci: *bio-inspired, hierarchical sutures, FEM (Finite Element Methods).*

1. Pendahuluan

Struktur rangka sebuah bangunan atau jembatan umumnya menggunakan *joint*. *Joint* yang digunakan biasanya menggunakan baut atau *rivet* sedangkan kampuh atau penyambungannya menggunakan plat berlubang [1]. Penyambungan ini memerlukan plat berlubang yang memenuhi syarat-syarat terhadap kegagalan terhadap beban aksial maupun beban radial. Elemen penyambung

menjadi faktor untuk menentukan kemampuan suatu struktur untuk menahan beban yang diberikan pada struktur [2].

Elemen penyambung pada suatu struktur memiliki kekuatan atau ketahanan yang berbeda beda ditinjau dari berbagai hal, contoh nya geometri *joint*, dan *mechanical properties* atau sifat mekanik dari material tersebut [3]. Berbagai metode dilakukan untuk menanggulangi masalah

masalah pada *joint* seperti faktor geometri dan sifat mekanik pada material untuk menahan beban yang diberikan pada struktur seperti penelitian yang telah dilakukan oleh W.Wang dkk [3].

Kemampuan untuk mendistribusikan beban dan pengoptimalan kekuatan dimiliki juga oleh rusa ekor putih. Rusa ekor putih termasuk salah satu dari 171 spesies dalam taksonomi ordo *Artiodactyla* dan banyak dijumpai di bagian utara Amerika dan florida. Rusa jantan akan membawa tanduknya yang berat, menahan tekanan yang terjadi di tengkorak akibat benturan dari perkelahian, tentu akan menimbulkan tegangan pada tengkorak rusa. Rusa ekor putih memiliki pola jahitan dari kranial yang cukup unik yang terdapat diantara tulang tengkorak. Pola jahitan kranial dari tengkoraknya memiliki struktur *hireracy* dengan pola gelombang panjang [4]. Pola jahitan yang kompleks ini juga dimiliki oleh karapas penyu telinga merah, komposit paruh pelatuk [5], [6] dan jahitan pada fosil amonit [4]. Geometri tulang dari jahitan tengkorak yang menyerupai bentuk segitiga inilah yang menjadi sumber inspirasi desain dalam struktur khususnya *joint*.



Gambar 1. Struktur jahitan kranial pada tengkorak rusa ekor putih

Menurut penelitian N. Lee dkk [5] yang membahas tentang pengaruh struktur biologis pada burung pelatuk terhadap penyerapan energi didapatkan hasil bahwa geometri memanjang sisik keratin yang saling bergesekan dapat menurunkan porositas serta struktur dan properti dari paruh burung pelatuk dapat meningkatkan penyerapan energi. Menurut W. Wang dkk [3] yang membahas tentang pengaruh sebuah *joint*

dengan jahitan *hireracy* yang saling mengunci ketika dikenai gaya tarik didapatkan hasil bahwa dengan peningkatan jumlah jahitan *hireracy* pada *joint* dapat meningkatkan kekuatan *joint* secara keseluruhan.

Penelitian yang dilakukan oleh N. Lee [5] masih memiliki kekurangan yaitu belum adanya penerapan struktur dan dan properti dari paruh burung pelatuk terhadap penyerapan energi pada *joint*. Penelitian yang dilakukan oleh [3] juga memiliki kekurangan yaitu gaya yang diberikan hanya gaya tarik yang tegak lurus dengan luas penampang sedangkan untuk gaya yang tegak lurus dengan permukaan *joint* belum dilakukan pengujian. Perubahan pada pemberian gaya serta penerapan jahitan *hireracy* pada *joint* kami terapkan pada penelitian ini guna menutupi kekurangan kekurangan pada penelitian sebelumnya. Artikel ini ditulis guna memberikan gagasan atau ide untuk mengurangi masalah pada elemen *joint* berupa plat pada material suatu struktur yang terinspirasi dari makhluk hidup atau *Bio-Inspired*.

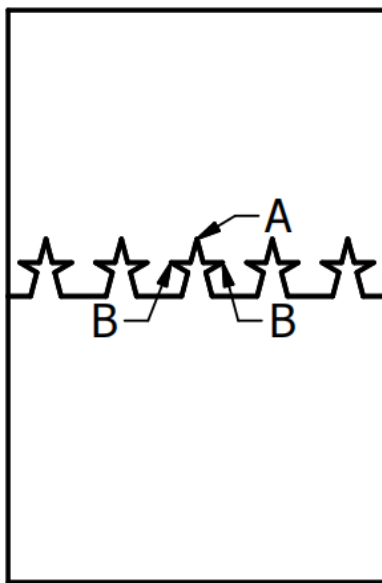
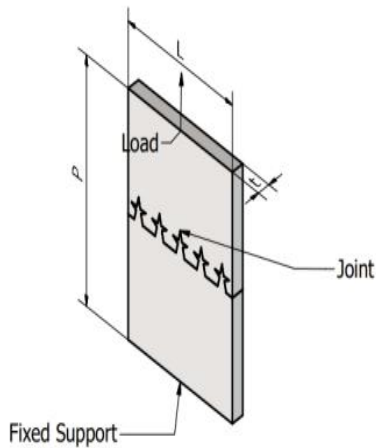
2. Metode Penelitian

2.1 Geometri Sambungan

Geometri *joint* dengan bentuk *hireracy* jahitan yang terinspirasi dari DNA rusa ditunjukkan pada Gambar 2 dengan dimensi $P = 60 \text{ mm}$, $L = 40 \text{ mm}$, $t = 4 \text{ mm}$. A menunjukkan orde 1 sedangkan B menunjukkan orde 2. Sudut orde 1 dan 2 divariasikan sebesar 30° , 45° , dan 60° sebagai parameter uji. Jumlah simulasi disusun berdasarkan *full factorial*, terdapat 2 parameter uji dengan 3 faktor, sehingga jumlah percobaan sebanyak $3^2=9$ percobaan yang ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi desain geometri

| No | Ordo 1 (°) | Ordo 2 (°) |
|----|------------|------------|
| 1 | 30 | 30 |
| 2 | 30 | 45 |
| 3 | 30 | 60 |
| 4 | 45 | 30 |
| 5 | 45 | 45 |
| 6 | 45 | 60 |
| 7 | 60 | 30 |
| 8 | 60 | 45 |
| 9 | 60 | 60 |



Gambar 2. Geometri *joint hierarchical sutures*

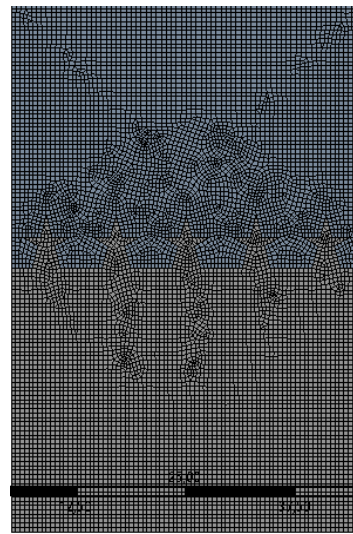
2.2 Boundary Condition

Kondisi batas untuk semua kombinasi berupa tumpuan tetap pada ujung plat dan *load displacement* pada rentang 0,2 mm – 4 mm pada ujung spesimen. Nilai *displacement* menjadi parameter untuk mengetahui sejauh mana bentuk desain yang memiliki nilai kekuatan tarik lebih baik.

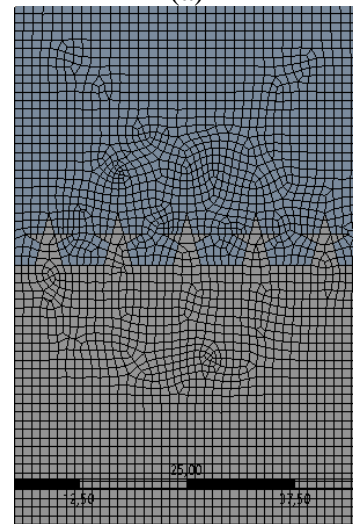
Tabel 2. Sifat mekanik material

| Sifat | Nilai |
|-----------------------------------|------------------------|
| Density, kg/m ³ | 1,44 x 10 ³ |
| Modulus, MPa | 2459 |
| Poisson ratio, | 0,3 |
| Tensile failure test, MPa | 49,8 |
| Elongation tensile break | 20% |
| Compressive yield stress, MPa | 52 |
| Elongation at compressive rupture | 50% |

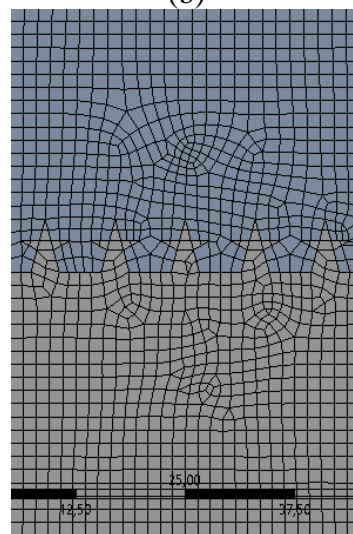
2.3 Meshing



(a)



(b)



(c)

Gambar 3. Hasil meshing berbagai ukuran (a) *mesh* 0,5 mm, (b) *mesh* 1 mm, (c) *mesh* 1,5 mm.

Mesh atau *grid* adalah proses membagi komponen yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen kecil. Semakin baik kualitas *mesh* maka akan semakin tinggi tingkat konvergensinya, sehingga akan mendapatkan data yang lebih berkualitas [8]. Perbandingan *mesh* yang dilakukan pada mesh 0,5, 1, dan 1,5 mm dapat dilihat pada Gambar 4.

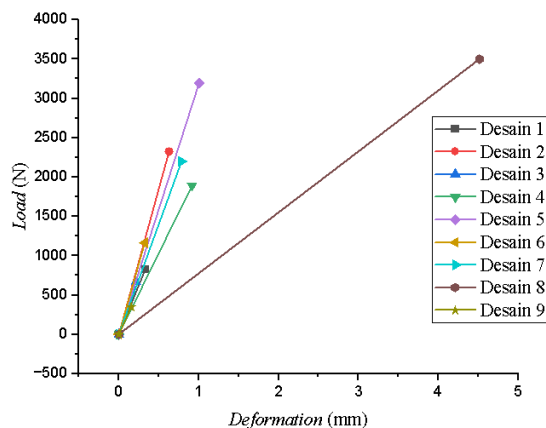
Tabel 3. Jumlah *mesh*

| Mesh (mm) | Nodes | Elements | Deviasi |
|-----------|-------|----------|---------|
| 0,5 | 97866 | 83856 | 0,1 |
| 1 | 53393 | 10556 | 0,12 |
| 1,5 | 19922 | 3645 | 0,14 |

Mesh yang digunakan dalam simulasi dengan menggunakan *mesh* 0,5 mm. Semakin besar jumlah *nodes* dan *element* maka nilai yang dihasil semakin optimal, dikarenakan deviasi pada *mesh* 0,5 mm memiliki nilai sebesar 0,1 mm. Deviasi yang besar maka, semakin rendah akurasi hasil simulasi. Deviasi yang kecil dapat diabaikan, tetapi deviasi yang besar dapat menyebabkan kesalahan yang signifikan [9].

3. Hasil dan Pembahasan

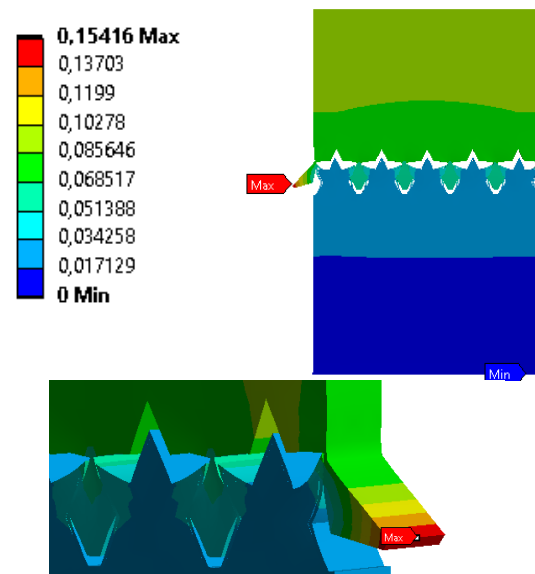
3.1 Total Deformasi



Gambar 4. Grafik hubungan total deformasi terhadap beban

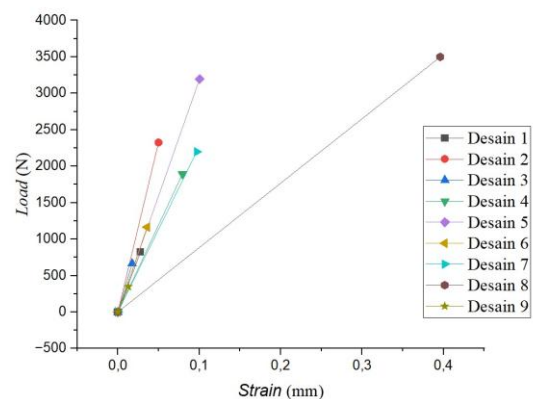
Pemberian *displacement* secara vertikal dengan memfokuskan hasil akhir kekuatan bentuk desain dalam menahan gaya tarik. Berdasarkan hasil yang telah dilakukan simulasi, Seperti pada Tabel 4 dibawah ini,

dimana menunjukkan fenomena deformasi yang terjadi pada setiap desain yang berbeda ketika diberikan beban sampai mengalami kegagalan bentuk. Deformasi total terbesar terjadi pada pada ordo 1 60° dan ordo 2 45° seperti pada Tabel 1 dengan nilai deformasi sebesar 4,513 mm dan nilai deformasi total terkecil didapatkan pada bentuk desain 9 dengan nilai 0,154 mm. Besarnya deformasi dipengaruhi oleh luas penampang dan gaya yang diberikan. Bentuk desain 8 memiliki ordo 1 60° dan ordo 2 45°, sedangkan bentuk desain 9 memiliki ordo 1 60° dan ordo 2 60°.



Gambar 5. Bentuk optimal geometri desain 9

3.2 Regangan



Gambar 6. Hubungan regangan terhadap beban

Regangan terjadi dikarenakan adanya gaya luar yang bekerja pada benda seperti gaya tarik, gaya geser, dan gaya puntir. Simulasi yang digunakan menggunakan gaya tarik dengan panjang

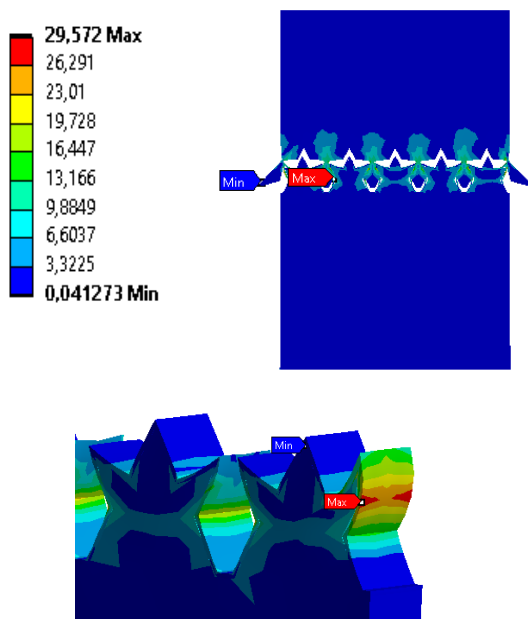
displacement 0,2 mm – 4 mm. Hasil regangan bisa didapatkan dengan Persamaan 1.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1)$$

Dimana:

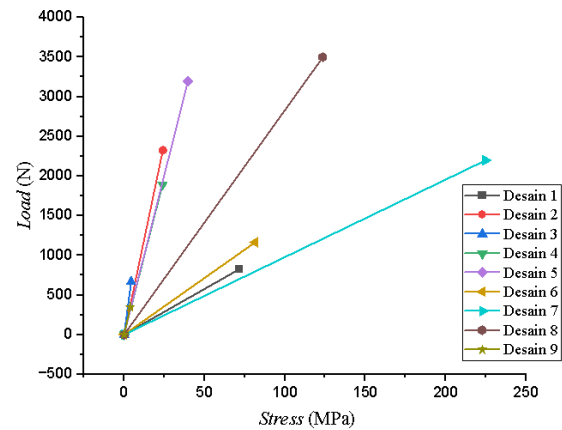
- ϵ = Regangan
- ΔL = Perubahan Panjang (mm)
- L_0 = Panjang mula-mula (mm)

Berdasarkan Tabel 5 dan Gambar 7 didapatkan bahwa bentuk desain 8 memiliki nilai regangan yang paling besar sebesar 0,397 dikarenakan kekuatan tarik maksimal pada bentuk desain mencapai 3500 N. Regangan terkecil didapatkan pada desain 9 dengan nilai 0,013 dengan gaya tarik maksimal 346,27 N. Berdasarkan hasil tersebut nilai regangan pada desain 8 dan 9 didapatkan bawah, faktor eksternal yang dapat mempengaruhi *principal strain* pada sebuah desain yaitu beban. Pertambahan berat beban pada sebuah struktur diikuti dengan pertambahan *principal strain* yang terjadi. Hasil *Principal strain* memiliki nilai yang berbeda – beda, dikarenakan kekuatan tarik maksimal pada bentuk desain menghasilkan nilai yang tidak sama. Desain 9 memiliki konfigurasi pada ordo 1 60° dan ordo 2 60°, dimana konsentrasi regangan yang signifikan terjadi pada ordo 2.



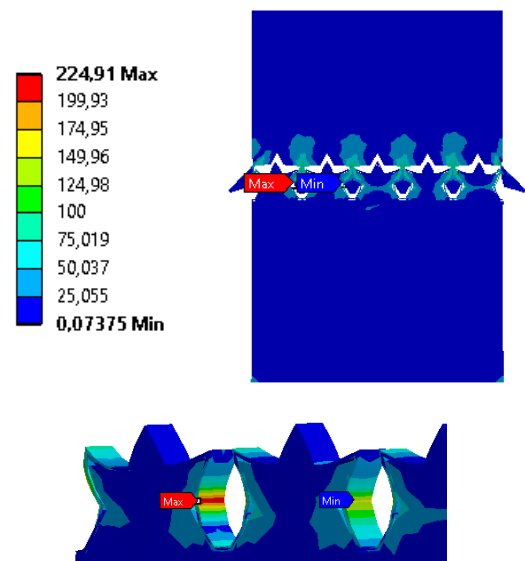
Gambar 7. Bentuk optimal geometri desain 9

3.3 Von - misses stress



Gambar 8. Grafik hubungan *von misses stress* terhadap beban

Tegangan yang terjadi pada *joint* jahitan merupakan fenomena yang terjadi ketika dikenai beban. Data hasil tegangan gaya internal pada *joint* jahit diukur dengan parameter dari berbagai arah (*equivalent von-misses stress*). Hasil tegangan terbesar terjadi pada spesimen desain 7 dengan nilai 224,91 MPa dan hasil tegangan maksimal terendah pada desain 9 dengan nilai 3,8121 MPa. Besarnya tegangan dipengaruhi oleh luas penampang dan juga gaya yang diberikan, pada desain 7 diketahui bahwa ordo 1 memiliki sudut 60° dan ordo 2 30°. Desain 9 memiliki sudut ordo 1 60° dan ordo 2 60°. Berdasarkan hasil kedua desain tersebut luas penampang dapat mempengaruhi hasil daripada tegangan (*equivalent von-misses stress*) yang terjadi.



Gambar 9. Bentuk optimal geometri desain 9

Indikator besar kecilnya deformasi, regangan dan tegangan yang terjadi berdasarkan warna pada *chart*. Pembacaan *chart* warna teratas (merah) menandakan keadaan maksimum sedangkan *chart* terendah (biru) mandakan dalam kondisi minimum. Kontak yang terjadi pada pemodelan menghasilkan kontur warna yang berbeda – beda sesuai dengan pembebanan yang diberikan.

Tabel 4. Hasil simulasi desain terhadap total deformasi, regangan dan *von - mises stress*

| Desain <i>Joint</i> | Total Deformasi (mm) | Regangan (mm) | <i>Von- mises stress</i> (MPa) |
|------------------------|----------------------------|------------------|---|
| 1 | 0,330 | 0,028 | 71,616 |
| 2 | 0,628 | 0,050 | 24,119 |
| 3 | 0,213 | 0,018 | 4,3456 |
| 4 | 0,916 | 0,079 | 23,923 |
| 5 | 1,004 | 0,100 | 39,693 |
| 6 | 0,326 | 0,036 | 81,549 |
| 7 | 0,785 | 0,097 | 224,91 |
| 8 | 4,513 | 0,396 | 123,66 |
| 9 | 0,154 | 0,013 | 3,8121 |

3.4 Pengaruh Sudut Ordo 1 dan 2 Terhadap Total Deformasi

Deformasi adalah perubahan bentuk benda akibat gaya yang bekerja terhadap suatu benda. Perubahan ini ditinjau melalui kondisi awal benda sebelum terkena gaya. Deformasi dapat disebabkan oleh adanya gaya eksternal maupun internal yang bekerja pada benda tersebut seperti gravitasi, elektromagnetik, pembebanan dan lain lain [10], [11]. Gambar 4 menunjukkan hubungan antara deformasi terhadap beban pada setiap desain. Dari grafik tersebut didapatkan hasil bahwa deformasi pada setiap desain mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya pembebanan yang diberikan sehingga semakin besar beban yang diberikan semakin besar pula defleksi yang terjadi pada material [12]

Besarnya defleksi tidak hanya dipengaruhi oleh pembebanan yang diberikan saja namun, bentuk geometri juga mempengaruhi deformasi yang terjadi. Geometri pengujian ini memiliki besaran sudut pada setiap ordo. Sudut-sudut ini akan memberikan pengaruh pada pendistribusian gaya pada struktur *joint*. Semakin besar ukuran

sudut pada *joint* maka akan mengalami penurunan tegangan dan regangan [13]. *Joint* dengan sudut yang lebih kecil memiliki beban yang lebih tinggi, sehingga kekakuan *joint* akan meningkat seiring dengan penurunan sudut [14]. Pengujian ini memberikan hasil yang sesuai dengan pernyataan diatas, dimana desain yang paling optimal dengan nilai deformasi terkecil dimiliki oleh desain 9. Bentuk dari Desain 9 yaitu ordo 1 dengan sudut 60° dan ordo 2 dengan 60°.

3.5 Pengaruh Sudut Pada Ordo 1 dan 2 Terhadap Regangan dan *Von – Mises Stress*

Regangan merupakan pertambahan panjang spesimen ditinjau dari panjang semula. Regangan terjadi dikarenakan adanya gaya luar yang bekerja pada benda seperti gaya tarik, gaya geser, dan gaya puntir. Hasil simulasi menunjukkan regangan yang terjadi pada *joint* akibat pemberian beban statis. Sama halnya dengan deformasi, regangan juga mengalami peningkatan pada setiap pembebanan yang diberikan. Berdasarkan gambar 8 dapat dilihat bahwa tegangan akan berpusat pada sudut di antara *joint*. Distribusi tegangan tertinggi di sudut *joint* akan berbanding lurus dengan regangan yang terjadi. Berdasarkan hukum hooke untuk elastisitas yang menyatakan bahwa tegangan akan berbanding lurus dengan regangan yang terjadi. Distribusi tegangan pada *joint* juga dipengaruhi oleh besaran sudut setiap ordo. besar sudut pada *joint* akan mempengaruhi luas area permukaan yang saling berkontak antar *joint*. Semakin besar sudut maka semakin besar peningkatan distribusi tegangan yang bekerja pada *joint* [15].

Berdasarkan Tabel 5 dan Gambar 7 didapatkan bahwa bentuk desain 8 memiliki nilai regangan yang paling besar sebesar 0,397 dikarenakan kekuatan tarik maksimal pada bentuk desain mencapai 3500 N. Regangan terkecil didapatkan pada desain 9 dengan nilai 0,013 dengan gaya tarik maksimal 346,27 N. Berdasarkan hasil tersebut nilai regangan pada desain 8 dan 9 didapatkan bawah, faktor eksternal yang dapat mempengaruhi principal regangan pada sebuah desain yaitu beban. Pertambahan berat beban pada sebuah struktur

diikuti dengan penambahan principal regangan yang terjadi. Hasil Principal regangan memiliki nilai yang berbeda – beda, dikarenakan kekuatan tarik maksimal pada bentuk desain menghasilkan nilai yang tidak sama. Desain 9 memiliki konfigurasi pada ordo 1 60° dan ordo 2 60° , dimana, konsentrasi regangan yang signifikan terjadi pada ordo 2.

3.6 Pengaruh Ordo 1 dan Ordo 2

Tegangan, regangan dan deformasi yang dihasilkan pada bentuk geometri DNA rusa dipengaruhi oleh kedua ordo tersebut. Ordo 1 dan ordo 2 difungsikan sebagai penguat *joint* internal pada benda benda yang membutuhkan kerataan pada bagian atas dan bawah benda. *Joint* dengan ordo 1 memiliki nilai tegangan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan ordo dua karena interlocking geometriknya lebih lemah dibandingkan ordo 2. Ordo 2 juga memiliki garis tengah *sinusoidal* sehingga tidak hanya menambahkan kekuatan namun juga meningkatkan daktilitas. Peningkatan jumlah ordo dalam *joint* ini dapat meningkatkan sifat mekanik dari material *joint* [3]. Spesimen dengan konfigurasi 45 dan 60 derajat memiliki keuletan yang lebih tinggi dalam penarikan beban hal ini terbukti dengan bentuk desain 7 yang memiliki beban penarikan 3500 N lebih besar dibandingkan desain 9 dengan $A=0$ yang hanya 346,27 N.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, ditemukan bahwa variasi dan kombinasi sudut ordo 1 dan ordo 2 dapat meningkatkan kekuatan *joint* terhadap beban tarik secara signifikan. Kombinasi sudut yang berbeda, seperti ordo 1 dan ordo 2, menunjukkan peningkatan dalam hasil beban penarikan dan regangan dibandingkan dengan konfigurasi sudut yang sama. Secara khusus, desain dengan konfigurasi sudut ordo 1 dan ordo 2 masing-masing sebesar 60° memberikan hasil yang optimal, dengan deformasi sebesar 0,154 mm, regangan 0,013, dan tegangan 3,8121 MPa. Hasil ini menegaskan bahwa pengaturan sudut yang tepat dapat

meningkatkan performa struktur dalam menahan beban tarik.

REFERENSI

- [1] 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.
- [2] R. M. S, L. Susanti, and E. A. Perkasa, “Rangka Canai Dingin Terhadap Lendutan,” *Rekayasa Sipil*, vol. 10, no. 3, pp. 205–210, 2016.
- [3] 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, 2021, doi: 10.1016/j.jmbbm.2020.104137.
- [4] Y. Li, C. Ortiz, and M. C. Boyce, “Bioinspired, mechanical, deterministic fractal model for hierarchical suture joints,” *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, vol. 85, no. 3, 2012, doi: 10.1103/PhysRevE.85.031901.
- [5] N. Lee, M. F. Horstemeyer, H. Rhee, B. Nabors, J. Liao, and L. N. Williams, “Hierarchical multiscale structure - Property relationships of the red-bellied woodpecker (*Melanerpes carolinus*) beak,” *J R Soc Interface*, vol. 11, no. 96, 2014, doi: 10.1098/rsif.2014.0274.
- [6] F. Xia and L. Jiang, “Bio-inspired, smart, multiscale interfacial materials,” *Advanced Materials*, vol. 20, no. 15. pp. 2842–2858, Aug. 04, 2008. doi: 10.1002/adma.200800836.
- [7] N. Lee, M. F. Horstemeyer, H. Rhee, B. Nabors, J. Liao, and L. N. Williams, “Hierarchical multiscale structure - Property relationships of the red-bellied woodpecker (*Melanerpes carolinus*) beak,” *J R Soc Interface*, vol. 11, no. 96, 2014, doi: 10.1098/rsif.2014.0274.

- [8] H. Patil and P. V. Jeyakarthekeyan, “Mesh convergence study and estimation of discretization error of hub in clutch disc with integration of ANSYS,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 402, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/402/1/012065.
- [9] S. Shi *et al.*, “Dynamic measurement error modeling and analysis in a photoelectric scanning measurement network,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 1, 2018, doi: 10.3390/app9010062.
- [10] *et al.*, “Kajian Eksperimen Deffoormasi Tekanan Pada Struktur Sarang Lebah Dengan Variasi Ukuran Hexagonal Yang Diuji Secara Statis,” *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2020, doi: 10.30596/rmme.v3i1.4522.
- [11] I. Ivañez, L. M. Fernandez-Cañadas, and S. Sanchez-Saez, “Compressive deformation and energy-absorption capability of aluminium honeycomb core,” *Compos Struct*, vol. 174, pp. 123–133, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.04.056.
- [12] A. Suparman, A. Sunardi, and M. Zaenudin, “Pengaruh Variasi Stuktur Rangka Terhadap Kekuatan Pembebanan Pada Stasiun Pengisian Daya Listrik dengan Panel Surya,” vol. 1, no. 1, pp. 11–18, 2023.
- [13] D. A. Catur, A. B. Pangestu, and I. D. Okariawan, “Pengaruh Sudut dan Jarak Z-Pin Terhadap Kekuatan Tekan dan Tarik Komposit Sandwich Dengan Inti Polyurethane Foam yang Dibuat Dengan Metode VARI (Vacuum Assisted Resin Infusion),” *Dinamika Teknik Mesin Universitas Mataram*, pp. 1–7, 2021.
- [14] N. Abid, M. Mirkhalaf, and F. Barthelat, “Discrete-element modeling of nacre-like materials: Effects of random microstructures on strain localization and mechanical performance,” *J Mech Phys Solids*, vol. 112, pp. 385–402, 2018, doi: 10.1016/j.jmps.2017.11.003.
- [15] S. Adi Widyanto, A. Suprihanto, O. Kurdi, and J. S. Sudarto, “Penentuan Sudut Kemiringan Kritis Struktur Dinding Silo Berkapasitas Penyimpanan 4650 Ton,” vol. 22, no. 3, pp. 201–207, 2020.