

OPTIMASI PARAMETER DESAIN PADA STRUKTUR HELICOIDAL UNTUK MENINGKATKAN NILAI *FLEXURAL STRENGTH* DENGAN METODE *FULL FACTORIAL DESIGN*

DESIGN PARAMETER OPTIMIZATION OF HELICOIDAL STRUCTURE TO INCREASE FLEXURAL STRENGTH USING FULL FACTORIAL DESIGN METHOD

Riana Sania Septiani¹, Rino Andias Anugraha², Teddy Sjafrizal³

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

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

³teddysjafrizal@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Kekuatan yang tinggi adalah salah satu faktor penting dalam menentukan performansi pada komposit, dengan susunan komposit yang kuat maka konstruksi akan lebih tahan terhadap deformasi sehingga tidak mudah rusak, kuat dan tahan terhadap benturan. Struktur helicoidal salah satu bentuk struktur yang dapat meningkatkan sifat mekanik material, terutama ketahanan frakturnya, dan memungkinkan kekuatan dan isotropi bidang. Terdapat beberapa faktor penyusun struktur helicoidal, yaitu besar surut orientasi penyusun dan ketebalan *layer* untuk mendapatkan nilai *flexural strength* yang tinggi. Dilakukan percobaan dengan menggunakan metode *full factorial design* untuk mengetahui nilai *flexural strength* masing-masing desain dan menentukan desain optimal dengan kekuatan tertinggi. Analisis statistik menggunakan ANOVA dilakukan untuk mengukur tingkat signifikansi. Dihasilkan desain optimal struktur helicoidal dengan besar orientasi sudut [0/7°/...] dan tebal layer 0.2 mm.

Kata kunci: Struktur helicoidal, *flexural strength*, *factorial design*, ANOVA

Abstract

High strength is one of the important factors in determining performance in composites, with a strong composite arrangement so that the construction will be more resistant to deformation so that it is not easily damaged, strong and resistant to impact. The helicoidal structure is one form of structure that can enhance the mechanical properties of the material, especially its fracture resistance, and allow strength and isotropy of the field. There are several factors that make up the helicoidal structure, namely the receding besat orientation of the builder and the thickness of the layer to obtain a high flexural strength value. Experimented using full factorial design method to know the flexural strength value of each design and determine the optimal design with the highest strength. Statistical analysis using ANOVA was conducted to measure the level of significance. Generated optimal design of helicoidal structure with large angle orientation [0/7°/...] and layer thickness of 0.2 mm.

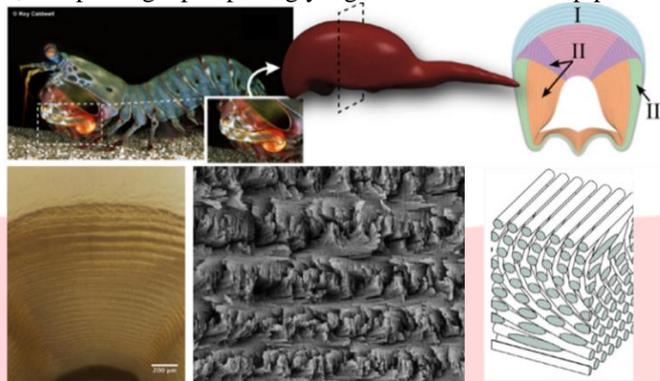
Keywords: *Helicoidal structure*, *flexural strength*, *full factorial design*, ANOVA

1. PENDAHULUAN

Alam merupakan sumber inspirasi tak terbatas dan terkaya yang dapat dikembangkan dan diperdalam oleh manusia. Kini, *bio-inspired design* banyak dikembangkan oleh para peneliti untuk mengembangkan solusi inovatif hampir di setiap disiplin ilmu [1]. Salah satu struktur yang dapat ditemukan di alam adalah struktur helicoidal. Struktur helicoidal (bouligand) ditemukan pertama kali oleh Bouligand [2] dengan lapisan serat uniaksial yang dirakit secara berkala menjadi pola helicoidal yang biasa ditemukan pada banyak material biologis seperti pada Gambar 1.

Struktur helicoidal memiliki sifat mekanik kekakuan, kekuatan, elastisitas, dan kekerasan yang tinggi [3]. Struktur helicoidal dapat meningkatkan sifat mekanik material, terutama ketahanan frakturnya, dan memungkinkan kekuatan dan isotropi bidang. Oleh karena itu struktur helicoidal ini memiliki potensi yang bagus jika

diaplikasikan untuk sesuatu yang membutuhkan sifat mekanik tersebut seperti pada industri otomotif, material komposit pada penerbangan, dan perlengkapan perang yang harus tahan terhadap peluru.



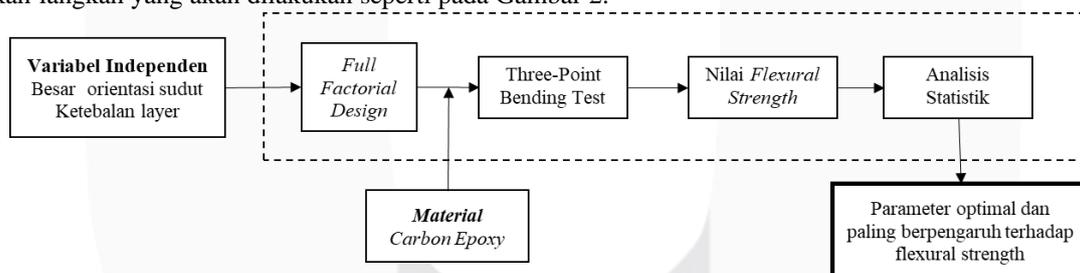
Gambar 1 Struktur helicoidal bio-inspired design [4]

Struktur helicoidal memiliki beberapa parameter utama yaitu besar orientasi sudut dan ketebalan layer [4]. Walaupun terdapat banyak penelitian mengenai bio-inspired, penelitian dengan memerhatikan parameter ketebalan masih terbatas. Seperti Grunenfelder [5] yang memilih struktur helicoidal dan membuat beberapa variasi sudut kecil, sedang, besar, dan quasi-isotropic laminates dan Cheng [6] melakukan eksperimen susunan laminasi struktur helicoidal diputar pada setiap layer dengan sudut relatif kecil dan dibuat empat variasi berbeda untuk diuji sifat mekanik *flexural strength*-nya. Hasilnya menyatakan bahwa terjadi peningkatan sifat mekanik signifikan pada struktur helicoidal yang memiliki perputaran fiber yang kecil seperti struktur helicoidal tunggal [6]

Oleh karena itu, tujuan dilakukannya studi ini adalah: (1) mengetahui desain optimal struktur helicoidal yang dapat meningkatkan nilai *flexural strength*; (2) mengetahui parameter penyusun struktur helicoidal yang memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan nilai *flexural strength*. Diharapkan studi ini dapat diunakan sebagai referensi dalam penyusunan material komposit.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Model konseptual merupakan penggambaran pola berpikir dalam pemecahan masalah dalam studi yang berupa langkah-langkah yang akan dilakukan seperti pada Gambar 2.



Gambar 2 Model konseptual

Studi ini diawali dengan analisa variabel independen yang menjadi input untuk membuat alternatif penyusunan struktur menggunakan konsep DOE dengan full factorial design [4,5]. *Full factorial design* dengan sistem desain 3^2 dengan dua faktor berbeda dan 3 level di dalamnya. Dengan *full factorial design*, dimaksudkan bahwa setiap percobaan lengkap atau replikasi percobaan semua kemungkinan kombinasi tingkat faktor dapat diselidiki [7]. Dilakukan eksperimen teknik uji *three-point bending* dengan simulasi pada *software* ABAQUS 18 untuk mengidentifikasi gaya reaksi maksimum dan digunakan pada untuk menentukan nilai *flexural strength*. Digunakan analisis statistik DOE ANOVA sehingga diperoleh desain optimal dan parameter yang paling berpengaruh terhadap nilai *flexural strength*.

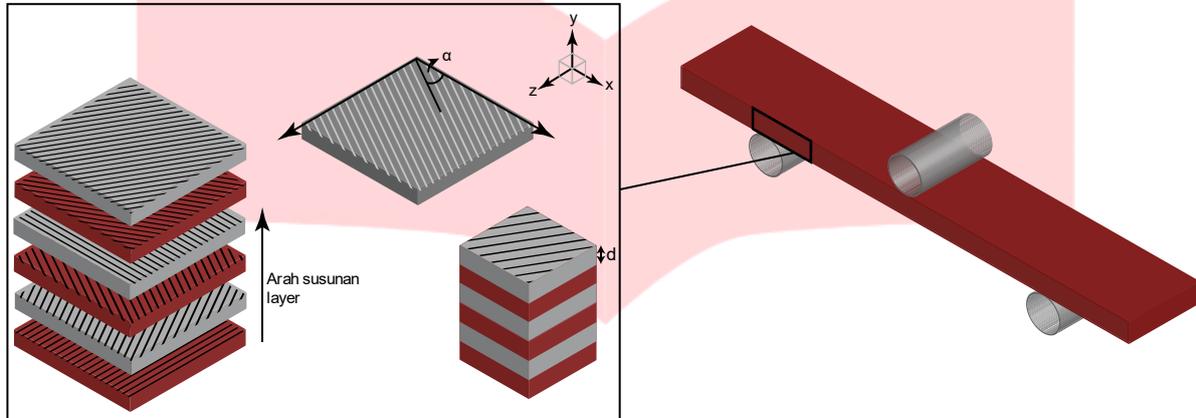
2.1. Skema Bio-composite design dan Material

Pada studi ini, terdapat dua faktor yang akan digunakan pada studi berdasarkan parameter penyusun helicoidal yaitu besar orientasi sudut [4] dan ketebalan layer [5]. Faktor dan level yang digunakan ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Faktor dan level

Faktor	Deskripsi	Level		
		1	2	3
A	Besar orientasi sudut ($^{\circ}$)	Kecil [0/7/...]	Sedang [0/15/...]	Besar [0/22/...]
B	Ketebalan <i>layer</i> (mm)	0.2	0.3	0.5

Besar orientasi sudut merupakan orientasi tiap arah serat pada masing masing layer dimulai dari lapisan dasar, dimana tiap kenaikan satu layer maka sudut akan bertambah sebanyak α derajat seperti dijelaskan pada Gambar 2.



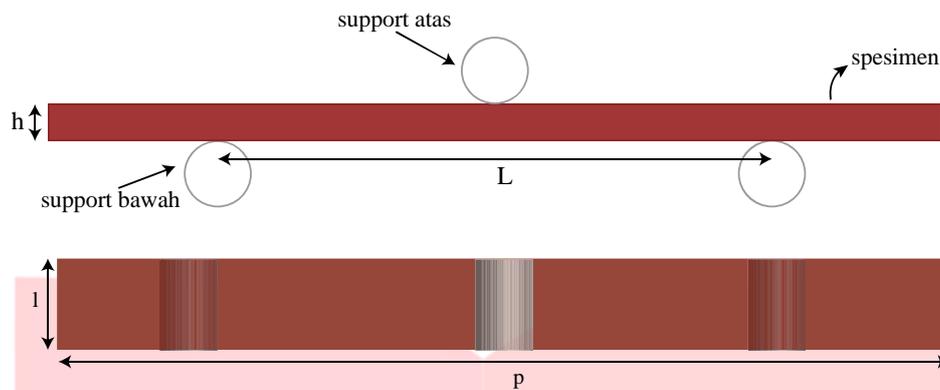
Material *carbon epoxy* menjadi input dalam pelaksanaan simulasi ini, *carbon epoxy* dipilih karena *epoxy* merupakan resin thermoset dan memiliki sifat rigiditas yang cocok dan sejalan dengan *performance* yang diharapkan.

Tabel 2 Material Properties Carbon Epoxy [8]

Material Properties		
Longitudinal modulus (E_{11})	141	GPa
Transverse modulus (E_{22})	8.7	GPa
In-plane modulus (G_{12})	5.6	GPa
Out of plane shear modulus (G_{13}, G_{23})	3.7	GPa
Poisson's ratio (ν_{12})	0.3	
Longitudinal Tensile Strength (F_{1t})	1925	MPa
Longitudinal Compression Strength (F_{1c})	1725	MPa
Transverse Tensile Strength (F_{2t})	76	MPa
Transverse Compression Strength (F_{2c})	228	MPa
Shear Strength (S)	57	MPa

2.2. Setup Eksperimen

Setup eksperimen didasarkan pada aturan standar ASTM D790 [9] untuk menentukan sifat flexural material. Digunakan spesimen dengan ukuran panjang (p) 127 mm, lebar (l) 12.7 mm, dan tebal (h) 2.5 mm dengan teknik uji *three-point bending* (Gambar 3) untuk menentukan sifat flexural. Spesimen diletakan pada dua penompang (*support*) untuk diberikan gaya dalam sumbu-y pada titik tengah spesimen. Jarak antara dua penompang (L) adalah 51.2 mm mengikuti rasio 16:1 antara jarak antar *support* (L) dengan tebal spesimen (h). Dikarenakan tebal spesimen tidak lebih dari 3.2 mm, maka masing masing *support* harus memiliki ujung yang lengkung dengan jari-jari 5 ± 0.1 mm.



Gambar 3 Setup three point bending ASTM D790

Simulasi *three-point bending* dilakukan pada software ABAQUS 18. Model analisis *static non-linear* digunakan karena material mengalami perubahan bentuk hingga melewati batas elastis, dengan tujuan untuk mengetahui respon spesimen sehingga mendapatkan gaya reaksi dan titik *failure* material komposit usulan. Pada simulasi non-linear, setiap support memiliki *reference point* (RP) yang digunakan sebagai lokasi dimana BCs diaplikasikan. *Fixed support* diimplementasikan pada bagian *support bawah*, *boundary conditions* (BCs) yang digunakan adalah $U1 = U2 = U3 = 0$, dan $UR1 = UR2 = UR3 = 0$ dimana *displacement* dan rotasi tidak berlaku. Sedangkan pada bagian *support atas*, *displacement* pada sumbu-x, sumbu-z dan rotasi tidak berlaku ($U1 = U2 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$).

Digunakan kontak general antara support dengan spesimen komposit yang dimodelkan dengan normal dan *tangential behavior*. Hard contact digunakan pada normal behavior, sedangkan koefisien gesek digunakan pada *tangential behaviour*. Pada akhirnya, *flexural strength* akan dikalkulasikan berdasarkan gaya reaksi (RF) pada *reference point* support bagian atas.

2.3. Uji Statistik

Uji statistik perlu dilakukan untuk mengetahui signifikansi faktor terhadap nilai *flexural strength*. Analysis of Variance (ANOVA) merupakan teknik yang digunakan dalam DOE, yang digunakan untuk menentukan faktor yang signifikan dari seluruh parameter desain [10]. Analisis ANOVA digunakan menggunakan software Minitab 18 diawali dengan uji normalitas untuk menentukan jenis ANOVA. Dilakukan analisis lanjut dengan Post-Hoc untuk mengetahui pengaruh dari faktor dengan *level* dan pengaruh faktor tersebut dengan nilai *flexural strength*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Eksperimen

Eksperimen dilakukan sebanyak 9 kali percobaan dengan mengamati gaya reaksi maksimum pada spesimen setelah dilakukan uji *three-point bending*. Semakin besar gaya reaksi yang ditimbulkan, maka mengindikasikan kemampuan struktur dalam mempertahankan bentuknya akan semakin baik..

Tabel 3 Hasil simulasi

Percobaan	Besar orientasi sudut (°)	Ketebalan layer (mm)	P_{max} (N)
E1	[0/7/...]	0.2	289.029
E2	[0/7/...]	0.3	191.142
E3	[0/7/...]	0.5	145.033
E4	[0/15/...]	0.2	188.681
E5	[0/15/...]	0.3	168.911
E6	[0/15/...]	0.5	132.113
E7	[0/22/...]	0.2	154.900
E8	[0/22/...]	0.3	136.198
E9	[0/22/...]	0.5	135.522

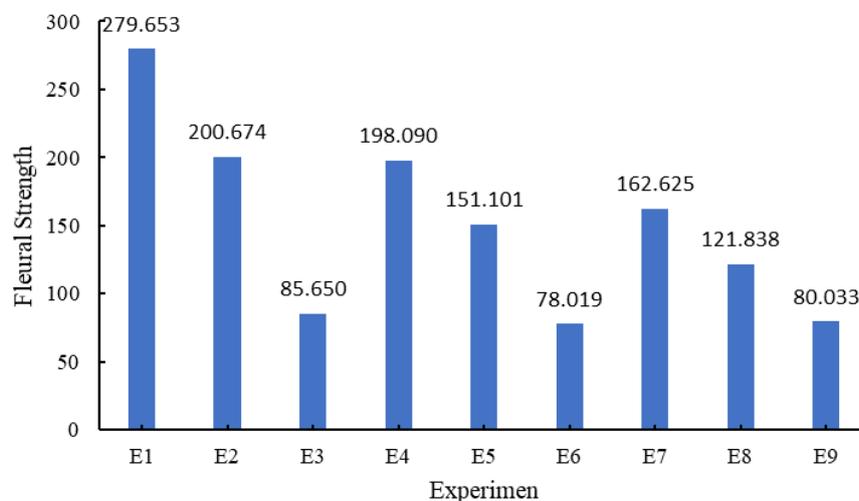
Hasil simulasi pada Tabel 3 menunjukkan bahwa spesimen pada percobaan ke-1 (E1) memiliki nilai gaya reaksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan percobaan lainnya, hal ini menunjukkan bahwa spesimen E1 memiliki kemampuan mempertahankan bentuknya lebih baik daripada percobaan lainnya.

Flexural strength merupakan suatu sifat yang penting untuk diketahui oleh para klinisi sebagai bahan pertimbangan dalam pemilihan material komposit. Dilakukan perhitungan *flexural strength* (σ_{fM}) seperti yang dicantumkan pada ASTM D790 menurut Persamaan 1.

$$\sigma_{fM} = \frac{3P_{max}L}{2bd^2} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana L merupakan panjang support span, *b* merupakan lebar spesimen, dan *d* merupakan tebal spesimen. Seluruh satuan panjang yang digunakan dalam persamaan ini adalah mm. Hasil perhitungan *flexural strength* yang tercantum pada Gambar 4 mengindikasikan bahwa nilai *flexural strength* tertinggi terjadi pada percobaan ke-1 (E1) dengan nilai *flexural strength* sebesar 279.653 MPa, sedangkan nilai *flexural strength* terendah terjadi pada percobaan ke-enam (E6) dengan nilai sebesar 78.019 MPa. Hal ini mengindikasikan bahwa pada susunan spesimen percobaan ke-enam lebih mudah patah ketika dibengkokkan, sedangkan pada E1 lebih tahan terhadap patahan meningkat sebanyak 358.4% dibandingkan dengan E6. Dengan demikian, desain optimal struktur helicoidal terjadi pada spesimen E3 dengan struktur tersusun dengan sudut orientasi [0/7°/...] dan tebal layer sebesar 0.2 mm.

Gambar 4 Nilai *flexural strength*



3.2 Analisis Uji Statistik

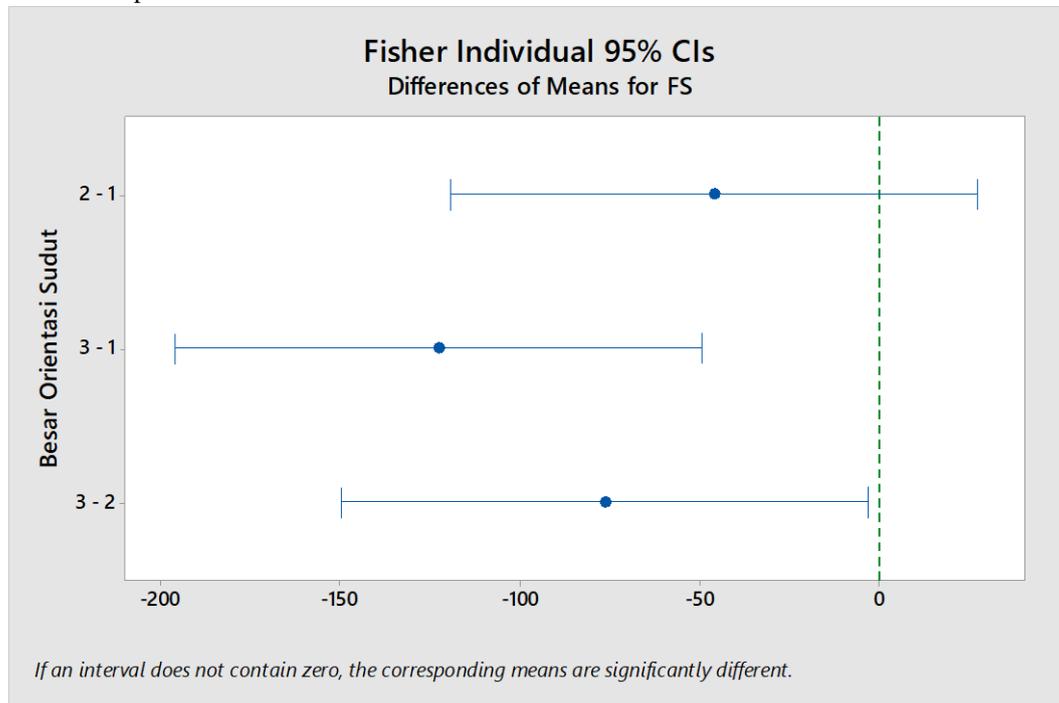
Uji statistik dilakukan uji parametrik ANOVA dengan dasar pengambilan keputusan (1) jika nilai P-value > 0.05, maka faktor tidak memberikan efek yang signifikan; (2) jika nilai P-value ≤ 0.05, maka faktor memberikan efek yang signifikan. Selain itu, untuk menentukan tingkat signifikansi faktor terhadap nilai *flexural strength*, dapat dilihat pada nilai F-value tiap faktor. Semakin besar nilai F-value pada faktor maka semakin besar pula efek yang diberikan terhadap nilai *flexural strength*.

Tabel 4 ANOVA

Faktor	F-Value	P-value	Deskripsi
Ketebalan layer	3.90	0.115	Tidak memberikan efek yang signifikan
Besar orientasi sudut	11.05	0.023	Memberikan efek yang signifikan

Pengujian ANOVA dilakukan dengan software Minitab 18 pada Tabel 4 memperoleh hasil bahwa faktor ketebalan layer memiliki nilai P-Value = 0.115, hal ini menyatakan bahwa ketebalan layer tidak memiliki efek yang signifikan terhadap nilai *flexural strength* karena nilai P-value yang lebih besar dari 0.05. Selain itu, faktor besar orientasi sudut memiliki nilai P-value = 0.023 yang berarti bahwa besar orientasi sudut memberikan efek yang signifikan terhadap nilai *flexural strength* karena memiliki nilai P-Value ≤ 0.05. Hal ini menyatakan bahwa jika ingin mengubah nilai *flexural strength*, maka prioritas utama faktor yang harus diubah adalah orientasi sudutnya.

Uji Post-Hoc dilakukan jika sudah diperoleh hasil signifikan dari dilakukannya ANOVA, hal ini diperlukan untuk memperoleh informasi spesifik mengenai perbandingan berpasangan [11]. Berdasarkan uji ANOVA, faktor besar orientasi sudut memiliki efek yang signifikan terhadap nilai *flexural strength*, maka pada uji Post-Hoc ini dilakukan untuk menentukan *level* mana yang memberikan perbedaan signifikan dalam faktor. Uji Post-Hoc yang digunakan pada studi ini menggunakan metode Fisher (LSD) dengan *Convidence Level* sebesar 95% atau 0.05 mengikuti default pada Minitab 18.



Gambar 5 Hasil uji Post-Hoc pada faktor besar orientasi sudut

Pada Gambar 5 dijabarkan grafik hasil pengujian Post-Hoc pada faktor besar orientasi sudut yang memberikan efek signifikan. Pada faktor tersebut, terdapat dua pasangan level yang memberikan perbedaan signifikan terhadap nilai *flexural strength*. Semakin jauh interval pasangan level terhadap nilai 0, maka akan semakin signifikan. Pasangan level yang memberikan efek signifikan yaitu perubahan antara level 3 dengan level 1, dan level 3 dengan level 2. Namun pada keduanya, pasangan antara level 3 dan level 1 memiliki perbedaan nilai *flexural strength* yang paling signifikan. Sedangkan orientasi sudut level 2 dan 1 memiliki rata-rata nilai *flexural strength* yang sama (tidak memiliki perbedaan yang signifikan). Hal ini sesuai dengan penelitian [6] yang mengatakan bahwa susunan rotasi sudut yang lebih kecil akan memberikan ketahanan terhadap kerusakan patahan lebih baik. Selain itu penelitian [5] menyimpulkan hal yang sama dengan menguji sifat mekanik lainnya (impact resistant). Berdasarkan tersebut dapat disimpulkan bahwa perbedaan orientasi sudut susunan [0/22°/...] dan susunan orientasi sudut [0/7°/...] memiliki perbedaan nilai *flexural strength* yang signifikan dibandingkan dengan perubahan orientasi sudut lainnya.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pada studi yang telah dilakukan, maka dapat diperoleh kesimpulan bahwa nilai *flexural strength* tertinggi pada susunan struktur dengan besar orientasi sudut [0/7°/...] dan tebal layer 0.2 mm. Adapun besar sudut orientasi yang berputar tiap layer merupakan faktor yang memberikan pengaruh paling signifikan dalam meningkatkan nilai *flexural strength*. Perbedaan paling signifikan terjadi pada orientasi sudut susunan [0/22°/...] dan susunan orientasi sudut [0/7°/...], nilai *flexural strength* dapat meningkat sebanyak 358.4% dari nilai *flexural strength* 78.019 MPa menjadi 279.653 MPa. Dengan meningkatnya nilai *flexural strength*, maka ketahanan terhadap patahan pun akan semakin besar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Hashemi Farzaneh dan U. Lindemann, *A Practical Guide to Bio-inspired Design*. 2019.
- [2] Y. Bouligand, "Twisted fibrous arrangements in biological materials and cholesteric mesophases," *Tissue Cell*, vol. 4, no. 2, pp. 189–217, 1972.
- [3] H. Jiang, Y. Ren, Z. Liu, S. Zhang, dan Z. Lin, "Low-velocity impact resistance behaviors of bio-inspired helicoidal composite laminates with non-linear rotation angle based layups," *Compos. Struct.*, vol. 214, no. 1, pp. 463–475, 2019.
- [4] N. Guarín-Zapata, J. Gomez, N. Yaraghi, D. Kisailus, dan P. D. Zavattieri, "Shear wave filtering in naturally-occurring Bouligand structures," *Acta Biomater.*, vol. 23, pp. 11–20, 2015.
- [5] L. K. Grunenfelder dkk., "Bio-inspired impact-resistant composites," *Acta Biomater.*, vol. 10, no. 9, pp. 3997–4008, 2014.
- [6] L. Cheng, A. Thomas, J. L. Glancey, dan A. M. Karlsson, "Mechanical behavior of bio-inspired laminated composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 42, no. 2, pp. 211–220, 2011.
- [7] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9th Ed., vol. 106, no. 11. 2017.
- [8] M. Harshitha and V. L. S. Banu, "Mechanical Behavior of Helicoidal and Pseudo-," vol. 7, no. V, pp. 3529–3534, 2019.
- [9] ASTM, "D790-03-Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulation Materials," *ASTM Stand.*, pp. 1–11, 2015.
- [10] C. F. J. Wu dan M. S. Hamada, *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization*, 2nd Ed. New Jersey: Wiley, 2009.
- [11] A. Field, *Discovering Statistics using SPSS*, 3rd Ed. California: SAGE, 2009.