

Analisis Geometri Dan Material Engsel Lentur Pada Rudder Model *Isoleted Tail* di Terowongan Angin

Prastiyo Siswo Prajoko^{1*}, Yanuar¹, I.Z. Pane¹

¹Departement of Mechanical Engineering Universitas Indonesia,
Kampus UI Depok 16424, Indonesia

*Corresponding Author : Prastiyo.siswo@ui.ac.id

Abstrak

Pengujian *hinge moments isolated tail* di *wind tunnel* adalah pengujian yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik fungsi kontrol kemudi *rudder* pada ekor pesawat terbang. Pengujian tersebut diperlukan pada saat pembuatan pesawat terbang. Engsel *rudder* memiliki peranan penting untuk menahan gaya saat diberikan hembusan angin, sehingga pesawat terbang tersebut mampu dikendalikan dengan efisien. Alat ukur yang digunakan untuk pengujian ini salah satunya adalah menggunakan sebuah engsel lentur simetris. Untuk dapat memperoleh alat ukur yang memadai, diperlukan pemilihan sensor *strain gauge* dan material dengan melakukan analisa finite elemen pada tingkat *deformasi* dan *stress test* nya. Tingkat deformasi adalah kemampuan engsel lentur melakukan penyimpangan saat dibebankan oleh gaya. Material yang baik akan memiliki tingkat deformasi yang paling minimal. Terbatasnya referensi mengenai model deformasi untuk engsel lentur, menjadi tantangan penulis. Namun, sudah dilakukan validasi atas formulasi tingkat deformasi yang digunakan terhadap hasil perhitungan menggunakan persamaan parabolic dan software ANSYS 2023R2, dan diperoleh hasil pada tingkat validasi yang baik.

Kata kunci: Parabolik engsel lentur, finite element analisis, terowongan angin

Abstract

The isolated tail hinge moments testing is a test with objective to determine the characteristics of the rudder control function on airplane's tail. This testing is required in manufacture of airplanes. The rudder hinge has an important role in resisting the force when wind force is applied, so that the airplane can be steered efficiently. One of the measuring tools used for this test is a symmetrical bending hinge. To be able to obtain adequate measuring instruments, it is necessary to select strain gauge sensors and the materials by carrying out finite element analysis on the level of deformation and stress tests. The degree of deformation is the ability of a bending hinge to deviate when subjected to force. Good materials will have the minimum level of deformation. Limited references regarding deformation models for flexible hinges are a challenge for the authors. However, validation of the deformation level has been performed which by comparing the result calculation using parabolic equations formula against the result calculation from ANSYS 2023R2 software, and the results obtained are at a good validation level.

Key words: *Parabolic bending hinge, finite element analysis, wind tunnel*

PENDAHULUAN

Engsel lentur adalah elemen pegas kompleks yang dapat merespons dan mengirimkan rotasi dan translasi. Setiap engsel lentur, disertai dengan serangkaian Compliance yang menentukan respons mekanisnya terhadap pembebanan secara statis. Secara umum, engsel lentur dapat diklasifikasikan menjadi tiga kelompok, yakni sumbu single, sumbu dua, dan sumbu banyak. (N.Lobontiu et al.,2020).

Terkait dengan teori kegagalan, komponen mekanis biasanya gagal karena salah satu sebab berikut: kegagalan pada hasil (*yield failure*), kegagalan karena patah (*fracture failure*), atau kegagalan karena proses yang Panjang (*fatigue failure*). Fenomena kegagalan saat ini dilihat sebagai proses yang tidak dapat dikembalikan yang berkembang secara lokal dan melalui struktur makro dan kinerja operasional komponen diubah secara negatif. (N.Lobontiu et al.,2020).

Material elastis (terutama logam) biasanya kegagalan yang terjadi adalah pada hasil (*yield failure*), di mana deformasi melebihi Batas proporsionalitas dan masuk ke wilayah plastik yang tidak dapat dipulihkan. Bahan elastis (misalnya, logam khas seperti baja ringan, aluminium, titanium, tembaga, dan magnesium dan beberapa paduannya, serta non-logam seperti Teflon mampu mengalami deformasi plastik besar sebelum patah. (N.Lobontiu et al.,2020).

Sementara bahan rapuh biasanya gagal karena patah (*fracture fail*), karena hanya menimbulkan deformasi kecil sebelum pecah, dibandingkan dengan bahan lentur. Contoh bahan rapuh termasuk besi cor, beton, kaca atau senyawa keramik, silikon, dan senyawa berbasis silikon. (N.Lobontiu et al.,2020).

Kegagalan kelelahan (*fatigue failure*) biasanya terjadi pada apabila mengaplikasikan bahan elastis dan bahan rapuh keduanya, yang mana disebabkan oleh tekanan yang kurang dibanding kekuatan akhirnya. Tekanan seperti itu mungkin terjadi secara statis pada basis yang lebih jarang, ketika beban tidak diterapkan berulang kali, tetapi kegagalan memanifestasikan dirinya dalam waktu, karena retakan, misalnya, berkembang ke ukuran kritis. Namun lebih sering, fatigue failure dihasilkan oleh beban siklik, di mana beban dan deformasi diterapkan pada komponen mekanis lebih dari sekali secara berulang. (N.Lobontiu et al.,2020).

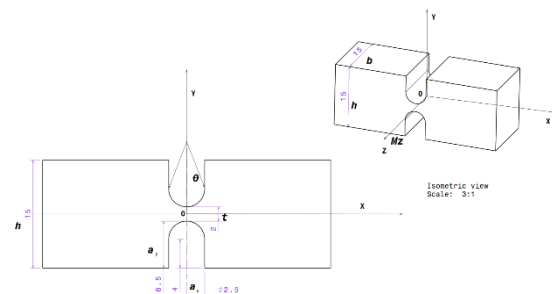
Pada penelitian ini, akan dilakukan pengujian beberapa tipe engsel lentur yang dibedakan berdasarkan bahan material yang digunakan. Akan dilihat bahan material yang mana yang paling efektif, dan memberikan kelenturan yang paling baik digunngakan untuk pengujian model uji *isolated tail* di *wind tunnel Indonesia low speed tunnel* Serpong Banten.

METODE

1. Perhitungan kekakuan untuk engsel lentur parabolik

a. Rumus rotasi engsel lentur di sumbu *vertical rudder*

Engsel fleksibel Parabolik simetris, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, adalah jenis lentur tertentu yang terdiri dari leher ke bawah bagian. Parameter t, h, b merupakan engsel fleksibel terkecil ketebalan, tinggi dan lebar, masing-masing, parameter α_x adalah sumbu semi minor parabolik, dan α_y adalah sumbu semiminor dari parabolik.



Gambar 1. Model of symmetric parabolic flexible hinge

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, sumbu absis yaitu $\Delta x = \Delta(\rho \sin \theta)$ Untuk memulai, itu bagian yang sangat kecil adalah vertikal terhadap sumbu *axis*. Itu deformasi sudut engsel fleksibel α_x dihasilkan di bawah torsi M_z seperti yang diberikan dalam Persamaan 1

$$\alpha_z = \int_{-\alpha_x}^{\alpha_x} \frac{M_z(x)}{El(x)} dx \quad (1)$$

$$= \frac{12M_z a_x}{E b a_y^3} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\cos \theta}{\left(\frac{t}{a_y} + 2 - 2 \cos \theta\right)^3} d\theta$$

$$f_1 = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\cos \theta}{\left(\frac{t}{a_y} + 2 - 2 \cos \theta\right)^3} d\theta \quad (2)$$

$$= \frac{12s^3(2s+1)}{(4s+1)^{5/2}} \arctan \sqrt{4s+1} + 1 \frac{2s^3(16s^2+4s+1)}{(4s+1)^2(2s+1)}$$

Dimana

$$s = \frac{a_y}{t}$$

- b. Tegangan maksimum engsel lentur di sumbu vertical rudder

Berdasarkan pembahasan pada *Compliant Mechanism Design of Flexure Hinges*, maksimum tegangan dari pengujian scenario stress dapat diperoleh dengan menggunakan formula matematis berikut,

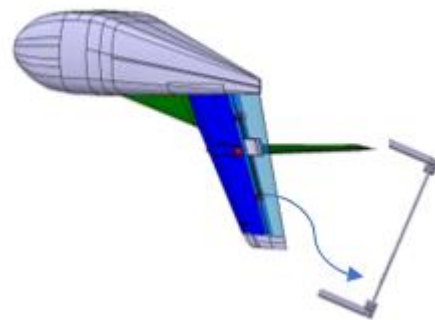
$$\sigma_1 = \frac{M}{I(0)} y \quad (3)$$

Dimana M adalah *bending moment*, dimana $M = M_z + F_y R \sin \theta_m$ dan y adalah jarak antara titik yang dikenakan *stress* dan sumbu *axis* tanpa dikenakan *stress*, $y = \frac{t}{2}$. Kemudian, $I(0)$ adalah momen inersia yang dihitung dari *transverse* fase sumbu *axis* sebelum dikenakan *stress*, $I(0) = \frac{bt^3}{12}$. Sehingga, maksimum tegangan pada titik tersebut, besarnya adalah:

$$\sigma_{1max} = 6 \frac{M_z + F_y R \sin \theta_m}{bt^2} \quad (4)$$

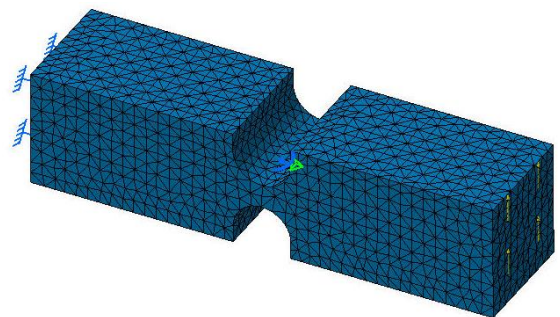
2. Analisis Finite Element Flexure Hinge

Analisis *finite element* diperlukan untuk mendapatkan bahan terbaik yang nantinya menghasilkan efektifitas maksimum dari engsel lentur simetris yang dibuat, serta hasil pengukuran yang lebih akurat. Sebelum dilakukan analisis *finite element*, terlebih dahulu engsel lentur di desain dengan menggunakan aplikasi CATIA V5-6R2022, yakni membuat desain awal engsel lentur ganda pada sumbu *vertical* pesawat khususnya *rudder* sebagai berikut,



Gambar 2. Design Double flexure Hinge

Berikut adalah detail dimensi dari kedua *flexure hinge* yang digunakan (ukuran kedua sisi adalah sama), yaitu dengan dimensi $r = 2.5\text{mm}$, $T = 2\text{mm}$, $H = 15\text{mm}$, $b = 15\text{mm}$.



Gambar 3. Finite element model Flexure Hinge

Setelah desain dibuat, dihasilkan gambaran engsel lentur yang disesuaikan dengan kebutuhan pengujian pada ekor pesawat. Dapat dilihat pada Gambar 3.

pengujian dilakukan dengan alat ukur yang memiliki 2 sisi identik. dimana sisi yang satu berfungsi untuk menerima gaya angin dari kanan dan sisi yang lain berfungsi untuk menerima gaya angin dari sisi kiri disaat pesawat bergerak *yawing moment* atau berbelok pada saat pengujian terowongan angin. Kemudian, untuk mendapatkan material yang

paling efektif digunakan dalam pembuatan engsel lentur, dilakukan pengujian stress atas maksimum deformasi dari berbagai macam bahan material yang digunakan menggunakan aplikasi ANSYS 2023R2 sebagai berikut,

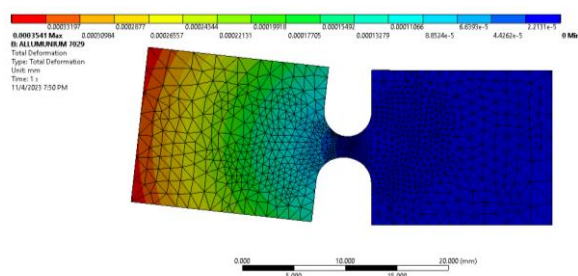
Table 1. Material *flexure hinge*

Materials	Density kg/m ³	Youngs modulus GPa	Poisson s ratio	Tensile yield strength MPa	Compressive yield strength MPa	Tensile ultimate strength MPa
ALLUMUNIUM 7029	2770	72	0.33	380	380	430
STEEL ASTM A455	7800	200	0.29	240	240	620
STEEL AISI 8620H	7850	205	0.29	360	360	565

Sumber: <https://www.matweb.com/>

Untuk masing-masing material yaitu Alluminium 7029, Steel ASTM A455, dan Steel AISI 8620H, dilakukan pengujian FEA deformasi menggunakan perangkat lunak Ansys dengan pemberian bending moment ($M = 0.2 \text{ N.m}$) pada basic model.

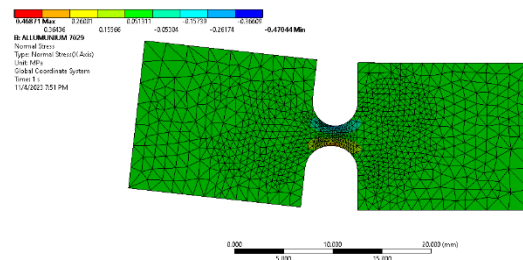
Material Alluminium 7028 memiliki nilai maksimal deformasi sebesar $3.541e-004 \text{ mm}$ dengan rata-rata deformasi $3.130e-004 \text{ mm}$ seperti ditampilkan pada gambar 4.



Gambar 4. Hasil FEA Deformasi dari Material Alluminium 7029

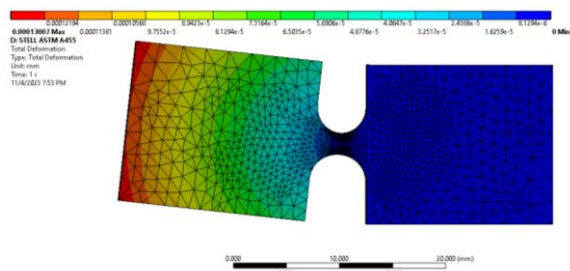
Normal stress dikenakan pada basic model untuk material alluminium 7028 ini dan nilai maksimal deformansi hasil stress test nya adalah

0.46871 MPa seperti ditampilkan pada gambar 5.



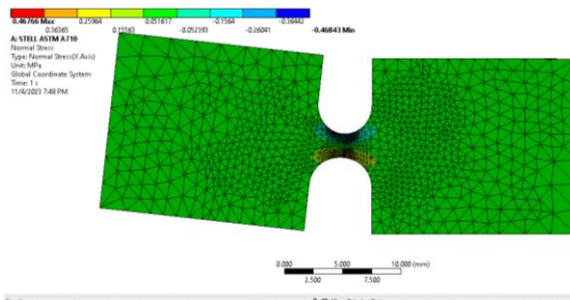
Gambar 5. Hasil FEA stress stuktur dari Material Alluminium 7029

Material Steel ASTM A455 memiliki nilai maksimal deformasi sebesar $1.307e-004 \text{ mm}$ dengan rata-rata deformasi $1.309e-005 \text{ mm}$ seperti ditampilkan pada gambar 6.



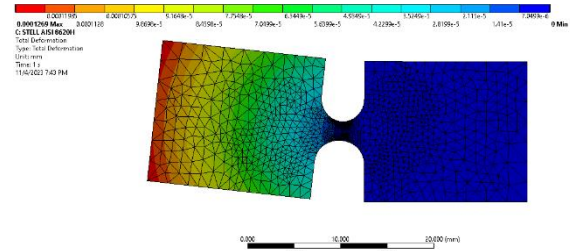
Gambar 6. Hasil FEA Deformasi dari Material Steel ASTM A455

Normal stress dikenakan pada basic model untuk material Steel ASTM A455 ini dan nilai maksimal deformasi hasil *stress test* nya adalah 0.4676 MPa seperti ditampilkan pada gambar 7.



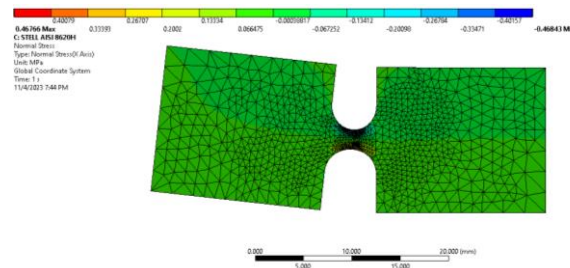
Gambar 7. Hasil FEA *stress* stuktur dari Material Steel ASTM A455

Material Steel AISI 8620H memiliki nilai maksimal deformasi 1.269e-004 mm dengan rata-rata deformasi 1.309e-005 mm seperti ditampilkan pada gambar 8.



Gambar 8. Hasil FEA Deformasi dari Material Steel AISI 8620H

Normal stress dikenakan pada basic model untuk material Steel AISI 8620H ini dan nilai maksimal deformasi hasil *stress test* nya adalah sebesar 0.46766 MPa seperti ditampilkan pada gambar 9.



Gambar 9. Hasil FEA *stress* stuktur dari Material Steel AISI 8620H

Table 2. Hasil Pengukuran Menggunakan FEA

Material	Total Deformasi (mm)	Max Stress (MPa)
ALLUMINIUM 7029	3.541e-004	0.46871
STEEL ASTM A455	1.3007e-004	0.46766
STEEL AISI 8620H	1.269e-004	0.46766

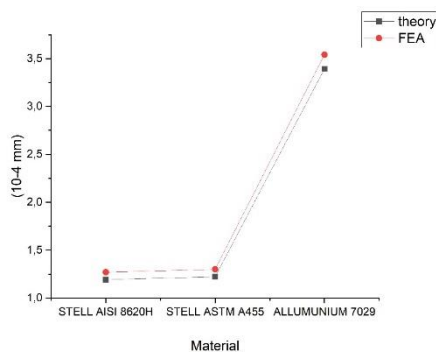
Dengan minimalnya total deformasi yang dimiliki, hasil pengujian menggunakan flexure hinge yang dibuat dari material Steel AISI

8620, menjadi lebih konsisten dan dapat dibandingkan dari waktu ke waktu.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisa deformasi yang dilakukan menggunakan software ANSYS 2023R2, engsel lentur parabolic besik struktur dengan ukuran dimensi $b=15mm$, $t=2mm$, $\alpha_x = 2,5mm$, $\theta_m = 90^\circ$ $\alpha_y = 6,5mm$ menunjukkan bahwa Material yang memiliki total deformasi paling minimal adalah Steel AISI 8620. Dengan minimalnya total deformasi yang dimiliki, hasil pengujian menggunakan flexure hinge yang dibuat dari material Steel AISI 8620, menjadi lebih konsisten dan dapat dibandingkan dari waktu ke waktu. Dibandingkan dengan material yang lain, hasil pengukuran dengan material yang total deformasinya lebih tinggi, akan lebih tidak konsisten.

Hasil perhitungan deformasi ini sesuai dengan perhitungan menggunakan formula rotasi engsel lentur di sumbu vertical rudder pada persamaan (2), berikut adalah grafik perbandingan perhitungan deformasi menggunakan software ANSYS 2023R2 dengan formula pada persamaan (2).

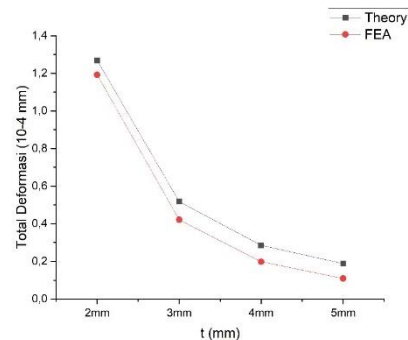


Grafik 1. Total Deformasi perbandingan antara nilai teori dengan nilai FEA berdasarkan Berdasarkan Material

Grafik 1. Menunjukkan bahwa efektifitas perhitungan total deformasi menggunakan aplikasi Ansys adalah baik dan dapat dijadikan acuan dalam analisa finite element flexure hinges.

Sebagai validasi tambahan, dilakukan juga analisa dimensi atas material Steel AISI 8620, dalam hal ini akan dianalisa hasil stress dengan membandingkan maksimum stress apabila ketebalannya ditingkatkan dari 2mm menjadi 3mm, 4mm, dan 5mm. Berikut merupakan grafik maksimum stress yang diperoleh

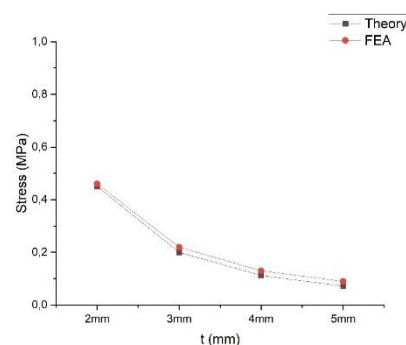
menggunakan ANSYS 2023R2 dan juga menggunakan formula ketegangan maksimum pada Persamaan (4).



Grafik 2. Total deformasi perbandingan antara nilai teori dengan nilai FEA berdasarkan Ketebalannya (t)

Grafik 2. juga menunjukkan bahwa efektifitas perhitungan total deformasi menggunakan aplikasi Ansys adalah baik dan dapat dijadikan acuan dalam analisa finite element flexure hinges.

Berdasarkan Grafik (2) diperoleh kesimpulan bahwa semakin tebal dimensi yang ditentukan, semakin kecil tingkat kelenturannya. Sehingga ketebalan 2mm adalah ketebalan yang lebih efektif dibandingkan apabila ketebalannya ditingkatkan.

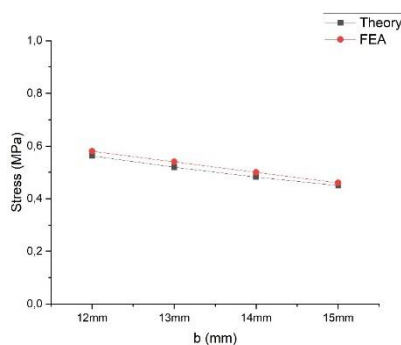


Grafik 3. Maksimum tegangan/stress perbandingan antara nilai teori dengan nilai FEA berdasarkan Ketebalannya (t)

Sama hal nya dengan validasi yang dilakukan sebelumnya, Grafik 3. juga menunjukkan bahwa efektifitas perhitungan total deformasi menggunakan aplikasi Ansys adalah baik dan dapat dijadikan acuan dalam analisa finite element flexure hinges.

Berdasarkan Grafik (3) diperoleh kesimpulan bahwa tegangan engsel lentur berkurang kurvanya seiring dengan ketebalan tidak meningkat. Namun bila $t > 2\text{mm}$, tegangan maksimum berubah sedikit, sedangkan $t < 2\text{mm}$, seiring menurunnya t , tegangan semakin meningkat.

Sebagai tambahan, dilakukan juga pengujian maksimum tegangan/stress test dengan melihat impact pada perubahan nilai b .



Grafik 4. Maksimum tegangan/stress perbandingan antara nilai teori dengan nilai FEA berdasarkan Ketebalannya (b)

Grafik 4. menunjukkan tegangan internal engsel lentur berkurang secara signifikan dengan perubahan terhadap lebar b

Berdasarkan grafik 2 sampai dengan grafik 4, dapat diamati pengaruh dari Parameter engsel lentur terhadap tegangan internalnya, yakni pengaruh ketebalan t , dimana semakin besar (semakin tebal) akan memberikan total deformasi yang semakin kecil. kemudian pengaruh dari lebar b , dimana semakin besar (semakin lebar) akan memberikan total deformasi yang semakin kecil. Sehingga, untuk menentukan baik material maupun dimensi dari engsel lentur ini, serta pembeban yang dialami, dipastikan juga tegangan bagian dalam engsel lentur tidak lebih besar dari pada tegangan ijinnya, dan parameter struktur t dan b perlu ditetapkan secara tepat.

SIMPULAN DAN SARAN

Untuk dapat membuat engsel lentur dengan efektifitas maksimal serta hasil pengukuran yang akurat serta konsisten, diperlukan pengujian material yang dapat dilakukan menggunakan software ANSYS 2023R2. Pengujian dengan menggunakan software ANSYS 2023R2 sudah divalidasi dengan membandingkan hasil pengukurannya dengan formula perhitungan matematis. Material dengan total deformasi yang minimal mengindikasikan lenturan yang minim, sehingga lebih kokoh dan hasil pengukuran yang dihasilkan lebih konsisten. Berbeda dengan material yang memiliki total deformasi yang besar, artinya alat ukur yang dikasihkan akan lebih rentan terhadap gaya dorong.

Kemudian, untuk mengetahui dimensi seperti apa yang memberikan hasil pengukuran yang paling efektif, dilakukan juga pengujian stress dengan menguji beberapa sample dimensi engsel lentur. Pengujian dilakukan pada software ANSYS 2023R2 juga, dan menghasilkan kesimpulan bahwa engsel lentur dengan tinggi dan lebar yang minimal, memberikan total deformasi yang maksimal.

Setelah mendapatkan material dengan total deformasi yang minimal, dipilih juga dimensi yang memberikan deformasi maksimal. Hal ini untuk memastikan bahwa dari material yang dipilih, alat ukur yang akan dapat bekerja dengan stabil dan kokoh, namun dapat secara elastis menyesuaikan simpangan saat diberi gaya. Alat ukur yang dihasilkan akan elastis namun tidak mudah patah.

Dalam hal pengujian pada tulisan ini, dengan membandingkan 3 sample material Alluminium 7029, Steel ASTM A455, dan Steel AISI 8620H, dengan percobaan beberapa dimensi, diperoleh kesimpulan bahwa bahan Steel AISI 8620 dengan tebal 2mm lebar 15mm adalah yang paling efektif memberikan hasil pengukuran engsel lentur untuk dapat digunakan pada model uji pesawat di terowongan angin.

DAFTAR PUSTAKA

- Alan Pope J. B. Barlow, W. H. Rae, Jr. .1999.- Low Speed Wind Tunnel Testing. 1-John Wiley & Sons
- C. F. Yang, J. H. Yan, and Z. B. Zhang, 2021 "Research on Moment Amplitude Modulation Coefficient of Unbonded

- Prestressed Concrete Continuous Beam,” in 2021 7th International Conference on Hydraulic and Civil Engineering and Smart Water Conservancy and Intelligent Disaster Reduction Forum, ICHCE and SWIDR 2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 650–654. doi: 10.1109/ICHCESWIDR54323.2021.9656276.
- CAI Wei-wei, YANG Le-ping, LIU Xin-jian, ZHU Yan-wei 2013 Robust Optimal Guidance for Hypersonic Glide Vehicle with Hinge Moment Constraint. IEEE Control Systems Society, Zhongguo xi tong gong cheng xue hui, Chinese Association for Artificial Intelligence, Chinese Association of Automation, Technical Committee on Control Theory, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC) : May 25-27, 2013 : Guizhou Park Hotel, Guiyang, China.
- Chen, Hongjiang .2011. Analysis of the Rigidity of Arc Flexible Hinge with Different Geometrical Parameters. 5th Computer and Computing Technologies in Agriculture (CCTA) <https://inria.hal.science/hal-01361138>
- Chen, Xiaodong, Deng, Zilong, Hu, Siya, Gao, Jinhai, Gao, Xingjun. 2020. Design of a compliant mechanism based four-stage amplification piezoelectric-driven asymmetric microgripper <https://www.mdpi.com/2072-666X/11/1/25>
- Chunhui Yang 2012 Calculation and Analysis of Parabolic Flexure Hinge Ha’erbin-Ligong-Daxue, Annual IEEE Computer Conference, International Conference on Measurement, I. and C. 2012. 05. 18-20 H., & MIC 2012.05.18-20 Harbin. (n.d.). International Conference on Measurement, Information and Control (MIC), 2012 18-20 May 2012, Harbin, China.
- Dwi, Margi V. 2012. INTRODUKSI STRAIN GAUGE UNTUK PENGUJIAN MODEL PESAWAT DALAM WIND TUNNEL. INDEPT, Vol. 2, No. 3, Oktober 2012 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE): Sept. 16-18, 2011, Yichang, China: Proceedings. (n.d.).
- Gao Hao, Fan Jun-fang 2019 The Design Factor Analysis of a Miniaturized Rotating Guided Ammunition Actuator”. Proceedings of the 38th Chinese Control Conference July 27-30, 2019, Guangzhou, China
- H. Li and J. Yang, 2019 “Study on one type of 4-position load simulator system technology based large moment of inertia and high torque,” in Proceedings - 2019 2nd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing, WCMEIM 2019, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov. 2019, pp. 364–368. doi: 10.1109/WCMEIM48965.2019.00078.
- Huan Xie, Lixia Zhao, Wei Li, Bin Chen, ShengLin Xia, Jun Yin .2019 the optimization study on the mitigation strategy of hinge moment of aircraft with multi-control surfaces Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019 IEEE International Conference on Unmanned Systems and Artificial Intelligence (ICUSAI).
- J. He, B. Ai, X. Li, and R. Song, 2021 “Moment Test Technique of the Aircraft’s Water Rudder Hinge Based on Structural Loads,” in Proceedings - 2022 International Conference on Manufacturing, Industrial Automation and Electronics, ICMIAE 2022, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 195–201. doi: 10.1109/ICMIAE57032.2022.00044.
- Li, W., & Gao, C. (2010). Design and modeling of micro-displacement amplifying mechanism using revolute joints and flexible hinges. 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, ICICTA 2010, 1, 1147–1150. <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2010.681>

- Linß, S., Henning, S., & Zentner, L. (n.d.). Modeling and Design of Flexure Hinge-Based Compliant Mechanisms. www.intechopen.com
- Liu, M., Li, Y., & Zhan, J. (2022). Multi-Material Topology Optimization of Flexure Hinges Using Element Stacking Method. *Micromachines*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/mi13070993>
- Liu, M., Zhang, X., & Fatikow, S. (2016). Design and analysis of a high-accuracy flexure hinge. *Review of Scientific Instruments*, 87(5). <https://doi.org/10.1063/1.4948924>
- Masaaki Murakami, Koichi Yonemoto, Takahiro Fujikawa .2022. Ascent Guidance Trajectory Optimization Using Evolutionary Algorithm Considering Engine Gimbal and Aerodynamic Control *International Journal of Aeronautical and Space Sciences* (2022) 23:775–783 <https://doi.org/10.1007/s42405-022-00466-3>
- Meymian, N. Z., Clark, N. N., Musho, T., Darzi, M., Johnson, D., & Famouri, P. (2018). An Optimization Method for Flexural Bearing Design for High-stroke High-Frequency Applications. <https://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>
- Miao Yang, Zhijiang Du, and Wei Dong 2015 Modeling and Analysis of a Superelastic Hinge Using Elliptic Flexure Co-rotational Beam Elements *International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO)*. (2015). IEEE.
- Nicolae Lobontiu 2002 *Compliant Mechanisms_ Design of Flexure Hinges*-CRC Press
- Nicolae Lobontiu 2020 *Compliant Mechanisms_ Design of Flexure Hinges*-CRC Press
- Prasath, M., Ganesan, V. R., Sivaramakrishnan, A. E., Kurade, R., & Rao, S. (n.d.). ELEVATOR HINGE MOMENT STUDIES OVER GENERIC WINGED BODY CONFIGURATION.
- Roopa, R., Navin Karanth, P., & Kulkarni, S. M. (2018). Effect of flexure beam geometry and material on the displacement of piezo actuated diaphragm for micropump. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 310(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/310/1/012111>
- Smith, Stuart T. 2000 *Flexures _ Elements of Elastic Mechanisms*.-Chapman and Hall_CRC
- Wang, C. N., Yang, F. C., Nguyen, V. T. T., Nguyen, Q. M., Huynh, N. T., & Huynh, T. T. (2021). Optimal design for compliant mechanism flexure hinges: Bridge-type. *Micromachines*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/mi12111304>
- Wang Tianhao, Qiu Junwen and Liu Xihe 2010 Definition Measurement Unit with Flexure Hinges for a Wind Tunnel Balance *IEEE Robotics and Automation Society, Annual IEEE Computer Conference, IEEE International Conference on Information and Automation 7 2010.06.20-23 Harbin, & ICIA 7 2010.06.20-23 Harbin*. (n.d.). *IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, 2010 Harbin, China, 20-23 June 2010.
- Wei, H., Wang, L., Niu, X., Zhang, J., Mao, Z., Simeone, A., & Zhang, Q. (n.d.). Study of Effective Hinge Thickness of Additive-manufactured Flexure Mechanisms.
- Xia, L. (2023). Design and simulation analysis of flexible hinge structure in digital micromirror device. *Proceedings - 2023 International Conference on Mechatronics, IoT and Industrial Informatics, ICMIII 2023*, 196–198. <https://doi.org/10.1109/ICMIII58949.2023.00043>
- X. Li, H. Zhu, W. Lin, W. Chen, and K. H. Low, 2021 “Structure-Controlled Variable Stiffness Robotic Joint Based on Multiple Rotary Flexure Hinges,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*,

vol. 68, no. 12, pp. 12452–12461, Dec. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3044795.

Yang, J., Wei, H., & Li, Y. (2021). Modeling and analysis of CEAH revolute-notch type multi-axis flexure hinges for spatial compliant mechanisms. 2021 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale, 3M-NANO 2021 - Proceedings, 222–225. <https://doi.org/10.1109/3M-NANO49087.2021.9599811>

Zhang, G. Q., Yu, S. C. M., & Chien, A. (2013). Investigation of the three-dimensional hinge moment characteristics generated by the ONERA-M6 wing with an aileron. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/714168>