



## IMPLEMENTASI OPTIMASI TOPOLOGI DALAM PERENCANAAN KOMPONEN PENUNJANG MANIPULATOR PADA ROBOT PENANGANAN BENDA BERBAHAYA

Gilar Pandu Annanto<sup>1a</sup>, Fandy Indra Pratama<sup>2</sup>, Agung Nugroho<sup>1</sup>, Irvandianto Nugroho<sup>1</sup>, Sandif Prasetyo<sup>1</sup> Erik Firmansyah<sup>1</sup>, dan Farika Tono Putri<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Wahid Hasyim

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Informatik, Fakultas Teknik, Universitas Wahid Hasyim

<sup>3</sup>Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang

Korespondensi:

<sup>a</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Wahid Hasyim  
gilarpanduannanto@unwahas.ac.id

### ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengoptimalkan desain pada salah satu komponen penunjang pada manipulator robot kendali jarak jauh untuk penanganan objek berbahaya. Dalam penelitian ini, digunakan perangkat lunak CAD (Computer-Aided Design) dan CAE (Computer-Aided Engineering) untuk merancang dan menganalisis geometri bracket servo. Geometri awal dianalisis menggunakan material Poly-Lactic Acid (PLA) dengan mempertimbangkan kondisi batas berupa torsi maksimum yang dapat dikeluarkan oleh servo yang digunakan. Hasil analisis awal menunjukkan tegangan maksimal sebesar 3,936 MPa dan deformasi maksimal sebesar 0,062 mm. Proses optimasi topologi dilakukan untuk mereduksi area yang tidak mengalami tegangan besar, menghasilkan geometri baru dengan volume dan massa yang lebih rendah. Setelah optimasi, volume geometri berkurang sebesar 17,5% dan massa berkurang dari 97,213 g menjadi 81,776 g. Analisis lanjutan menunjukkan tegangan maksimal sebesar 3,881 MPa dan deformasi maksimal sebesar 0,09 mm, dengan penurunan tegangan maksimal sebesar 2% dan peningkatan deformasi sebesar 45%. Meskipun terjadi peningkatan deformasi, geometri baru tetap aman dengan faktor keamanan sebesar 18 dan nilai ini menkompensasi penurunan kekuatan apabila dilakukan manufaktur berbasis *fused deposition modeling* dengan *infill density* kurang dari 100%.

**Kata kunci:** Manipulator, Robot, Metode Elemen Hingga, Optimasi Topologi.

### ABSTRACT

*This research aims to develop and optimize the design of a supporting component in a remote-controlled robot manipulator for handling hazardous objects. In this study, CAD (Computer-Aided Design) and CAE (Computer-Aided Engineering) software were used to design and analyze the geometry of the servo bracket. The initial geometry was analyzed using Poly-Lactic Acid (PLA) material, considering the boundary condition of the maximum torque that the servo can exert. The initial analysis results showed a maximum stress of 3.936 MPa and a maximum deformation of 0.062 mm. Topology optimization was performed to reduce areas that do not experience significant stress, resulting in a new geometry with lower volume and mass. After optimization, the geometry volume decreased by 17.5%, and the mass reduced from 97.213 g to 81.776 g. Further analysis showed a maximum stress of 3.881 MPa and a maximum deformation of 0.09 mm,*

with a 2% reduction in maximum stress and a 45% increase in deformation. Despite the increase in deformation, the new geometry remains safe with a safety factor of 18, compensating for the reduction in strength when manufactured using fused deposition modeling with an infill density of less than 100%..

**Keywords:** Manipulator, Robot, Finite Element Method, Topology Optimization.

## 1. PENDAHULUAN

Penanganan pada sebuah kejadian atau situasi yang berbahaya memiliki tantangan khusus dalam proses penyelesaiannya. Prosedur yang diperlukan sangat bergantung pada sifat dan besarnya dari potensi bahaya yang akan mungkin akan ditimbulkan seperti bahaya radiasi, keracunan, atau bahkan memicu ledakan. Apabila besarnya bahaya yang ditimbulkan berada pada level yang dapat mencedarai atau bahkan mengancam jiwa dari manusia, maka sudah sewajarnya diperlukan sebuah teknologi untuk menyelesaikan hal ini [1].

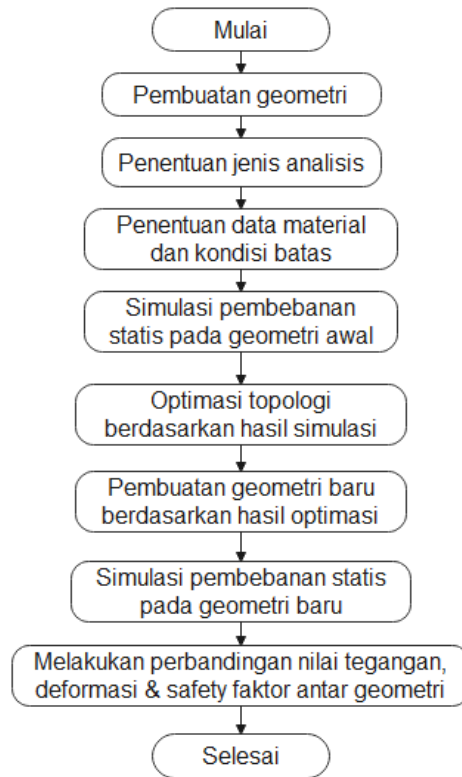
Teknologi robotika merupakan solusi yang dapat digunakan untuk menangani situasi yang dinilai membahayakan bagi manusia. Hal ini dikarenakan teknologi robotika mampu memberikan keleluasan dalam penanganan situasi berbahaya secara jarak jauh atau bahkan secara otomatis sehingga dapat meminimalisir potensi jatuhnya korban[2]. Beberapa robot yang telah dikembangkan diketahui dapat digunakan untuk penanganan objek – objek berbahaya seperti limbah nuklir [3,4], limbah elektronik [5,6], limbah rumah sakit [7], dan penanganan objek berdaya ledak seperti bom [8–12]

Maka dari itu, guna menanggulangi potensi resiko dalam penanganan situasi berbahaya dimasa yang akan datang , tim peneliti dari Universitas Wahid Hasyim berupaya untuk melakukan pengembangan robot kendali jarak jauh (*Tele-Operated Robot*) dengan fungsi manipulator yang dapat menggantikan peran manusia dalam penanganan objek berbahaya.

Dari studi literatur yang dilakukan, diketahui bahwa manipulator memiliki peran yang sangat penting dalam pengembangan robot yang dimaksud [13–15]. Hal ini dikarenakan fungsi dari manipulator dalam memberikan kekuatan serta ketangkasan yang diperlukan untuk menopang berat serta memindahkan objek yang ditangani [16–18]. Oleh sebab itu, fokus pada studi ini adalah melakukan evaluasi terhadap salah satu komponen penunjang yang ada didalam komponen manipulator dan kemudian dilakukan proses optimasi untuk mendapatkan geometri yang optimal.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

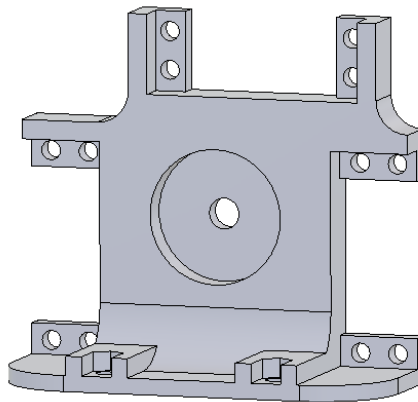
Dalam penelitian yang dilakukan, terdapat 2 perangkat lunak yang digunakan, yaitu perangkat lunak CAD (*Computer aided Design*) & CAE (*Computer aided Engineering*). Perangkat lunak CAD digunakan untuk mengolah geometri dan perangkat lunak CAE digunakan untuk melakukan analisis pembenanan serta mendapatkan geometri yang telah teroptimasi. Gambar 1 menunjukkan alur dari penelitian yang dilakukan.



**Gambar 1.** Alur penelitian

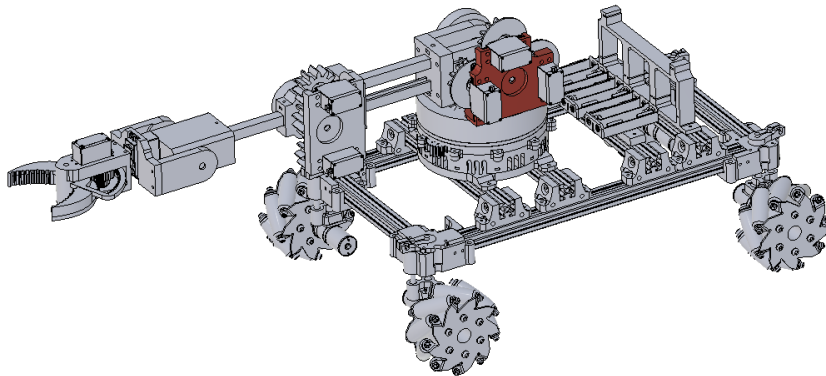
### Permodelan CAD

Permodelan yang dilakukan menggunakan perangkat lunak CAD menghasilkan geometri yang akan digunakan sebagai objek analisis pada perangkat lunak CAE seperti yang terlihat pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Geometri awal

Geometri yang digunakan sebagai objek analisis merupakan salah satu komponen yang digunakan pada lengan robot yang letaknya dapat dilihat pada komponen berwarna merah pada Gambar 3.



**Gambar 3.** Letak geometri pada rancangan robot penanganan benda berbahaya.

#### Penentuan material.

Geometri yang akan dianalisis direncanakan menggunakan material *poly-lactic Acid* (PLA), maka agar hasil analisis dapat mendekati kondisi aktual, digunakan data sifat material seperti yang terlihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Sifat material dari *poly-lactic Acid* (PLA) [19]

| Sifat material      | Nilai | Unit              |
|---------------------|-------|-------------------|
| Densitas            | 1240  | kg/m <sup>3</sup> |
| Modulus Elastisitas | 3500  | MPa               |
| Poisson's Ratio     | 0,36  | -                 |
| Kekuatan Luluh      | 70    | MPa               |

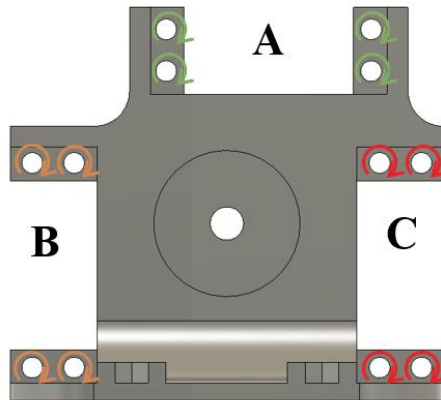
#### Penentuan Kondisi Batas

Kondisi batas yang digunakan dalam analisis mengacu pada nilai maksimal dari torsi yang dapat dikeluarkan oleh servo yang digunakan. Adapun spesifikasi dari servo yang digunakan dapat dilihat pada tabel 2.

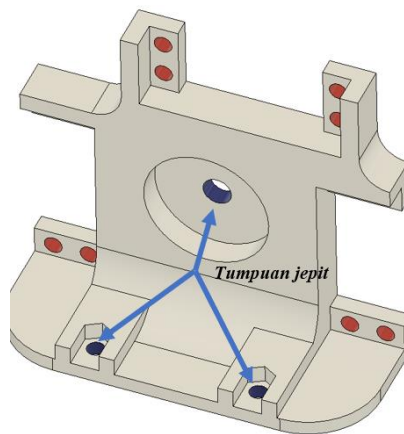
**Tabel 2.** Spesifikasi dari servo yang digunakan

| Parameter        | Nilai                         |
|------------------|-------------------------------|
| Voltage Range    | 4.8V/6.0V                     |
| Signal Frequency | 330 Hz                        |
| PWM Voltage      | 3.3V – 5.0V                   |
| Angle            | 180 derajat                   |
| Stall Torque     | 4.8V/29.kg.cm & 6.0V/35 kg.cm |

Nilai torsi sebesar 35 kg.cm tersebut kemudian diaplikasikan pada masing - masing bagian penopang servo seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4. Selain itu, area – area pada *bracket* yang digunakan untuk menopang struktur diberikan tumpuan berjenis tumpuan jepit seperti yang dapat dilihat pada area berwarna biru pada Gambar 5.



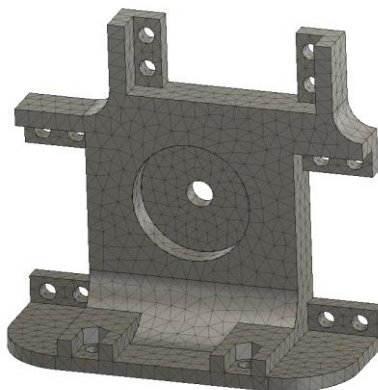
**Gambar 4.** Penempatan pembebanan yang dilakukan pada setiap *bracket servo* (A, B, & C).



**Gambar 5.** Penempatan tumpuan jepit pada geometri.

### Penentuan Mesh

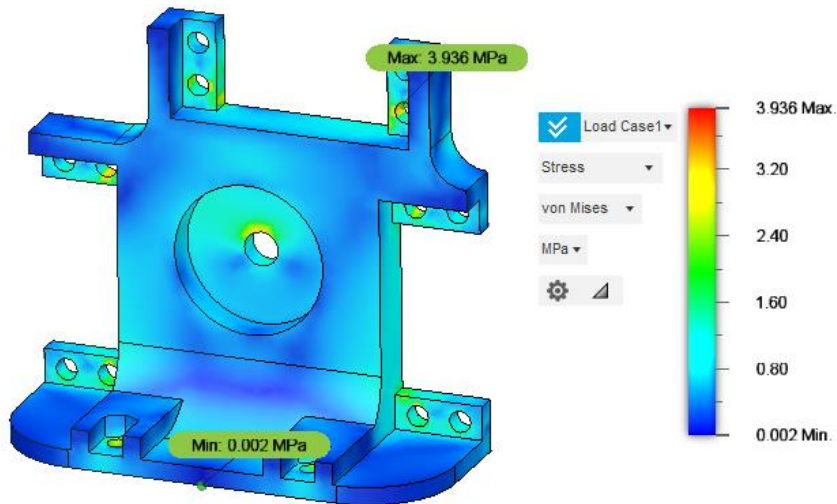
Sebelum dilakukan proses analisis, geometri dilakukan proses *mesh* terlebih dahulu. Proses *meshing* dilakukan dengan menggunakan *mesh* berjenis *tetrahedral*. Pertimbangan pemilihan *mesh* jenis ini dikarenakan kemampuannya dalam menghasilkan *surface contour* yang mendekati geometri mula - mula[20]. Setelah dilakukan proses *meshing*, didapatkan jumlah nodal sebesar 16072 dan jumlah elemen sebesar 8822. Hasil *mesh* yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 6.



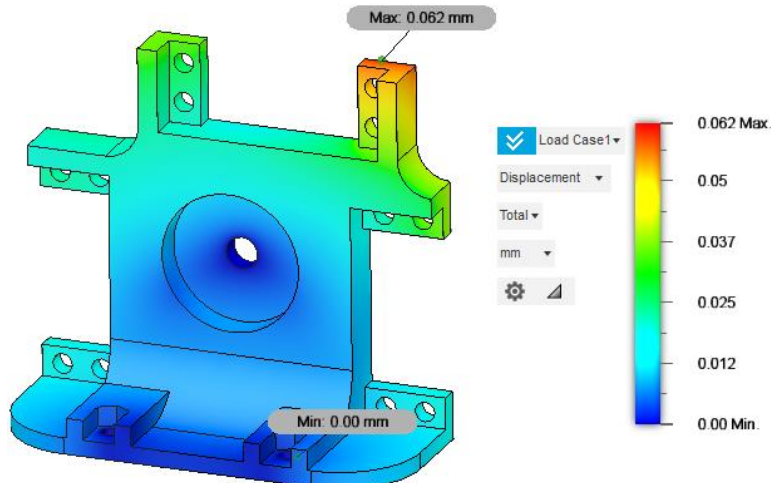
**Gambar 6.** Geometri yang telah dilakukan proses *meshing*.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis dengan menggunakan model pembebanan statis dilakukan sebagai langkah awal guna mendapatkan distribusi tegangan yang terjadi akibat pembeban yang dilakukan. Setelah analisis pembebanan dilakukan, didapatkan informasi berupa tegangan maksimal sebesar 3,936 MPa dengan deformasi maksimal sebesar 0,062 mm. Distribusi tegangan dan deformasi dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7. Distribusi tegangan pada geometri awal.

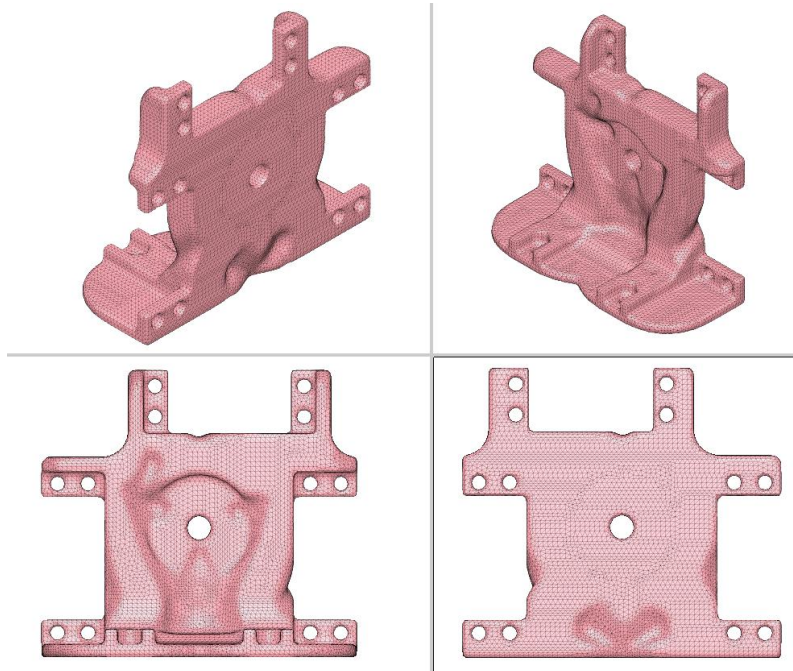


Gambar 8. Distribusi deformasi pada geometri awal.

Dari gambar 7, dapat terlihat bahwa masih terdapat banyak area yang tidak mengalami tegangan begitu besar dimana ditandai dengan warna biru. Hal ini menunjukkan bahwa geometri awal masih dapat dilakukan proses optimasi topologi guna mereduksi area – area tersebut guna mendapatkan geometri yang optimal. Proses optimasi topologi sendiri diketahui dapat memberikan dampak berupa pengurangan volume dan berat yang signifikan dengan tetap menjaga kekuatan dari struktur sehingga dapat menghasilkan rancangan yang optimal [21], selain itu rancangan yang optimal juga diketahui memiliki pengaruh salah satunya pada penurunan biaya produksi dikarenakan penggunaan material yang lebih sedikit [22].

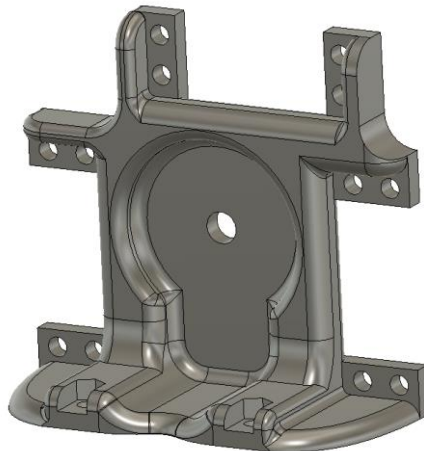
Dalam melakukan proses optimasi topologi, perangkat lunak CAE diberikan batasan yaitu mempertahankan nilai faktor keamanan  $>8$  dengan mengurangi berat semaksimal mungkin. Hasil dari

optimasi topologi yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 9. Perangkat lunak CAE secara otomatis melakukan pengurangan pada area – area yang tidak memiliki tegangan terlalu besar, namun seperti yang terlihat pada Gambar 9, geometri yang dihasilkan memiliki permukaan yang tidak beraturan. Permukaan yang tidak beraturan ini akan berpotensi menjadi masalah pada saat proses manufaktur, sehingga hasil dari optimasi topologi yang dilakukan tidak dapat dimanufaktur secara langsung dapat perlu dilakukan permodelan ulang.



Gambar 9. Geometri dari hasil optimasi topologi

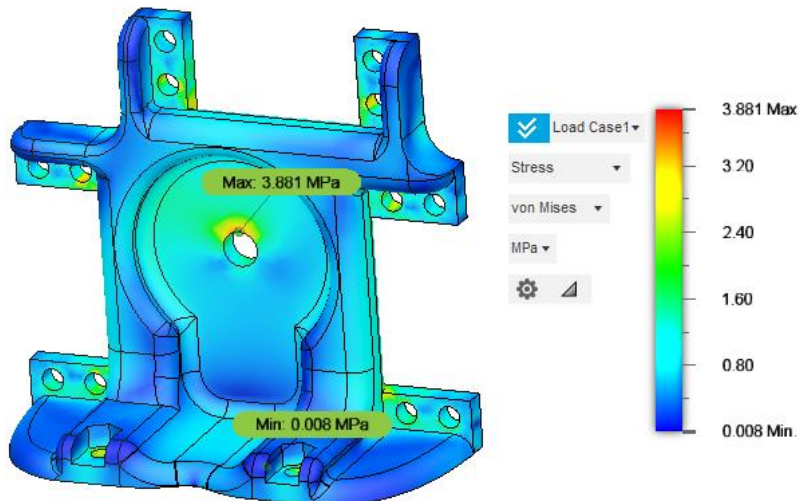
Permodelan ulang dilakukan pada geometri awal dengan mengacu pada hasil dari optimasi topologi. Gambar 10 menunjukkan hasil dari permodelan ulang yang dilakukan. Hasil permodelan ulang diketahui memiliki volume sebesar  $65498,173 \text{ mm}^3$ . Apabila dibandingkan dengan volume geometri awal, yang sebesar  $78397,676 \text{ mm}^3$ , dapat disimpulkan bahwa proses optimasi topologi mampu mengurangi volume hingga 17,5%. Pengurangan volume ini juga berdampak pada massa dari geometri, dimana sebelum dilakukan proses optimasi, geometri awal diketahui memiliki massa mencapai 97,213 g dan setelah di optimasi memiliki massa sebesar 81,776 g.



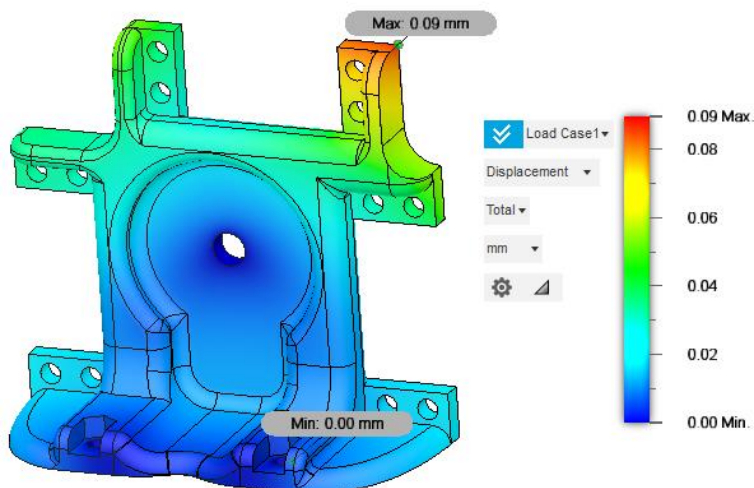
Gambar 10. Geometri baru dimodelkan ulang berdasarkan hasil optimasi topologi



Geometri yang telah dioptimasi kemudian dilakukan analisis untuk mengetahui persebaran tegangan serta deformasi yang akibat pembebanan. Analisis yang dilakukan menggunakan informasi material serta kondisi batas yang sama dengan analisis yang dilakukan pada geometri awal. Berdasarkan analisis yang dilakukan, diketahui geometri baru memiliki tegangan sebesar 3,881 MPa dan deformasi maksimal sebesar 0,09 mm. Distribusi tegangan dan deformasi dapat dilihat pada Gambar 11 dan Gambar 12. Apabila dibandingkan dengan hasil sebelumnya, diketahui terjadi penurunan tegangan maksimal sebesar 2%. Penurunan tegangan maksimal ini juga diikuti dengan perpindahan lokasi tegangan maksimal yang semula terletak pada bagian penopang servo menjadi pada bagian penumpu struktur. Namun, penurunan nilai tegangan berbanding terbalik dengan nilai deformasi dimana terjadi peningkatan sebesar 45%. Hasil analisis yang didapatkan masih tergolong pada nilai yang cukup aman, hal ini dilihat pada nilai faktor keamanan pada geometri baru sebesar 18. Nilai factor keamanan ini memang cukup tinggi, namun nilai masih dapat diterima dikarenakan komponen ini akan diproduksi menggunakan metode *fused deposition modeling* (FDM). Hal ini dikarenakan, dalam proses manufaktur menggunakan metode FDM tidak menggunakan *infill density* sebesar 100% untuk pertimbangan efisiensi produksi. Penurunan *infill density* ini juga diketahui selaras dengan penurunan kekuatan dari komponen yang diproduksi [23], sehingga nilai factor keamanan yang tinggi dapat memberikan kompensasi penurunan kekuatan yang mungkin akan terjadi.



Gambar 11. Distribusi tegangan pada geometri baru,



Gambar 12. Distribusi deformasi pada geometri baru



#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa proses optimasi topologi berhasil dilakukan. Proses optimasi topologi yang dilakukan telah menghasilkan geometri baru dengan volume dan massa yang lebih rendah. Penurunan massa dan volume yang terjadi diikuti dengan penurunan nilai tegangan sebesar 2% dan perubahan titik tegangan maksimal serta terjadi peningkatan deformasi sebesar 45%. Berdasarkan hasil yang didapatkan, Geometri baru yang dihasilkan masih dapat dikategorikan aman dikarenakan memiliki nilai faktor keamanan mencapai 18 dan masih memberikan kompensasi terhadap penggunaan *infill density* yang lebih rendah dalam proses manufaktur berbasis *fused deposition modeling*.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi yang telah memberikan dukungan melalui skema hibah Penelitian Dosen Pemula (PDP) tahun 2024 dengan nomor kontrak induk 108/E5/PG.02.00.PL/2024 dan nomor kontrak turunan 023/LL6/PB/AL.04/2024, 10/LP2M-UWH/PDP/VI/2024.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Trevelyan JP, Kang S-C, Hamel WR. Robotics in Hazardous Applications. Springer Handbook of Robotics, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2008, p. 1101–26. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5\\_49](https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_49).
- [2] Owen-Hill A. CASE STUDY 8: Five Highly Dangerous Jobs That Robots Can Do Safely. SMART MANUFACTURING: The Lean Six Sigma Way 2022;415–8. <https://doi.org/10.1002/9781119846642.other8>.
- [3] Vitanov I, Farkhatdinov I, Denoun B, Palermo F, Otaran A, Brown J, et al. A suite of robotic solutions for nuclear waste decommissioning. Robotics 2021;10. <https://doi.org/10.3390/robotics10040112>.
- [4] Petereit J, Beyerer J, Asfour T, Gentes S, Hein B, Hanebeck UD, et al. ROBDEKON: Robotic Systems for Decontamination in Hazardous Environments. 2019 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), IEEE; 2019, p. 249–55. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2019.8848969>.
- [5] Shreyas Madhav A V., Rajaraman R, Harini S, Kiliroor CC. Application of artificial intelligence to enhance collection of E-waste: A potential solution for household WEEE collection and segregation in India. Waste Management and Research 2022;40:1047–53. <https://doi.org/10.1177/0734242X211052846>.
- [6] Alvarez-de-los-Mozos E, Renteria A. Collaborative Robots in e-waste Management. Procedia Manuf 2017;11:55–62. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.133>.
- [7] Jain SK, Monish M, Gupta N, Raj SK, Subramanian K. Articulated Robot Arm for Garbage Disposal in Hospital Environment. ITM Web of Conferences 2023;56:01002. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20235601002>.
- [8] Mohite P, Jadhav M, Bagwan S, Bakare A. BOMB DETECTING BOT. International Research Journal of Engineering and Technology 2021.
- [9] Pushpa SD, Rahul D, Poonam P. Wireless Bomb Disposal Robot. International Research Journal of Engineering and Technology 2016.
- [10] Parmar R, Malik A, Shah Nawaz A, Parth B. Military Spying & Bomb Diffusing Robot with Night vision. 2017.
- [11] Keerthana S, Vellaiyan AR, Rajamohan M. Bomb detection and disposal robot: Aid for risky military fields. Int J Eng Adv Technol 2019;8:602–5. <https://doi.org/10.35940/ijeat.F8076.088619>.
- [12] Sen Gupta S. Arduino based Surveillance and Bomb Diffusion Robot with Rocker Bogie Mechanism and Two-way Talk Feature using Hand Gesture control Robotic ARM. International Research Journal of Engineering and Technology 2020.

- [13] Sohlbach L, Erchen S, Schmidt K. Development of a 5 DOF manipulator for a mobile Robot. 2020 21st International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM), IEEE; 2020, p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/REM49740.2020.9313081>.
- [14] Yadmellat P, Shafer AS, Kermani MR. Design and development of a safe robot manipulator using a new actuation concept. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE; 2013, p. 337–42. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6630597>.
- [15] Das Sharma K, Chatterjee A, Rakshit A. Experimental Study III: Control of Robot Manipulators, 2018, p. 281–93. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-1298-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-13-1298-4_10).
- [16] Bien DX, My CA, Khoi PB. Dynamic analysis of two-link flexible manipulator considering the link length ratio and the payload. Vietnam Journal of Mechanics 2017;39:303–13. <https://doi.org/10.15625/0866-7136/9234>.
- [17] Nakatsuru K, Wan W, Harada K. Implicit contact-rich manipulation planning for a manipulator with insufficient payload. Robotic Intelligence and Automation 2023;43:394–405. <https://doi.org/10.1108/RIA-02-2023-0018>.
- [18] Liu F, Xu W, Huang H, Ning Y, Li B. Design and Analysis of a High-Payload Manipulator Based on a Cable-Driven Serial-Parallel Mechanism. J Mech Robot 2019;11. <https://doi.org/10.1115/1.4044113>.
- [19] Farah S, Anderson DG, Langer R. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. Adv Drug Deliv Rev 2016;107:367–92. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>.
- [20] Mehmert P. Residual stress analysis and geometrical tolerances in powder bed fusion and direct energy deposition processes. Quality Analysis of Additively Manufactured Metals, Elsevier; 2023, p. 429–86. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88664-2.00014-2>.
- [21] Hayes AC, Träff EA, Sørensen CV, Willems SV, Aage N, Sigmund O, et al. Topology optimization for structural mass reduction of direct drive electric machines. Sustainable Energy Technologies and Assessments 2023;57:103254. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103254>.
- [22] Prathyusha ALR, Raghu Babu G. A review on additive manufacturing and topology optimization process for weight reduction studies in various industrial applications. Mater Today Proc 2022;62:109–17. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.604>.
- [23] Qamar Tanveer Md, Mishra G, Mishra S, Sharma R. Effect of infill pattern and infill density on mechanical behaviour of FDM 3D printed Parts- a current review. Mater Today Proc 2022;62:100–8. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.310>.