

Contents list available at [Sinta](https://sinta)**ARMATUR**

: Artikel Teknik Mesin &amp; Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur>**Analisis Kekuatan Sambungan Angel Corner Joint pada Aluminium Profile 2020 untuk Rangka Printer 3D Logam****Yupi Andrian<sup>1\*</sup>, Deri Teguh Santoso<sup>2</sup>, Uji Burrahman<sup>3</sup>, Afrialdy Ilham Almanyansyah<sup>4</sup>, Rangga Surya Syahputra<sup>5</sup>.**<sup>1,2,3,4,5</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jl. HS. Ronggo Waluyo, Teluk Jambe Timur, Karawang, Indonesia.*ARTICLE INFO*

*Keywords:*  
Aluminium profile 2020,  
Angel corner joint,  
FEM simulation,  
MIG welding,  
Material comparison

*ABSTRACT*

*This study analyzes the structural performance of angle corner joints in aluminium profile 2020, which serve as critical connectors in the frame of a metal 3D printer based on MIG welding. The rigidity of the frame directly influences printing accuracy and reliability under multi-directional loads. The objective is to evaluate the influence of material variation on stress distribution, deformation, and safety factor using the Finite Element Method (FEM) in ANSYS. Three materials were examined: Aluminium Alloy 6061-T6, Structural Steel S355, and Stainless Steel 316L. A three-dimensional CAD model of the corner joint was developed and subjected to a static multi-axis load of 150 N to represent realistic operational conditions, simulating forces generated during torch movement and vibration of stepper motors. The results indicate that maximum von Mises stress for all materials remains below their respective yield strengths, confirming elastic behavior. Structural Steel S355 produced the smallest deformation (0.065 mm) and the highest safety factor (4.34), while Aluminium Alloy 6061-T6 exhibited larger deformation (0.145 mm) and a lower safety factor (2.59), but still within safe limits. Stainless Steel 316L demonstrated intermediate performance with a safety factor of 2.26 and deformation of 0.102 mm. These findings highlight that material selection significantly affects stiffness, safety margin, and dimensional accuracy of the frame, ensuring*

\*Corresponding author: [yupiandrian85@gmail.com](mailto:yupiandrian85@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.24127/armatur.v7i2.11588>

Received 16 Mei 2026; Received in revised form 09 Juni 2026; Accepted 10 Juni 2026

Available online September 2026

## Pendahuluan

Perkembangan teknologi *additive manufacturing* telah mendorong penggunaan printer 3D logam berbasis pengelasan MIG (*Metal Inert Gas*) sebagai salah satu metode produksi yang efisien dan fleksibel [1]. Dalam sistem ini, rangka printer berfungsi sebagai penopang utama bagi torch MIG, motor stepper, serta panel elektrik yang terpasang di bagian atas. Oleh karena itu, rangka dituntut memiliki kekakuan dan kestabilan tinggi agar presisi hasil cetak dapat terjaga [2].

Salah satu komponen kritis dalam konstruksi rangka adalah sambungan *angle corner joint* pada aluminium *profile* 2020, yang berfungsi sebagai penghubung antar profil. Sambungan ini sering menjadi titik kritis karena menanggung beban gabungan dari mesin las MIG dan panel elektrik, serta beban dinamis akibat getaran motor stepper. Kelemahan pada sambungan dapat menyebabkan deformasi rangka, *misalignment torch*, bahkan kegagalan struktural yang berdampak langsung pada kualitas hasil cetak logam [3].

Dalam perancangan struktur mekanik printer 3D logam, pemilihan material sambungan menjadi faktor utama yang memengaruhi kekuatan dan kekakuan rangka. Aluminium Alloy 6061-T6 dikenal ringan dan mudah dirakit, namun memiliki batas luluh yang relatif rendah dibandingkan baja [4]. Structural Steel S355 menawarkan kekuatan tinggi dan deformasi kecil sehingga lebih stabil terhadap beban multi-sumbu [5]. Sementara itu, Stainless Steel 316L memiliki keunggulan pada ketahanan korosi meskipun lebih berat dan kurang rigid [6].

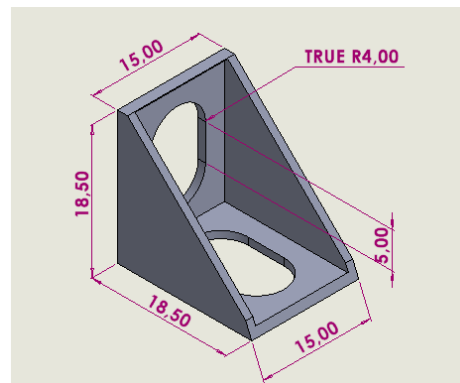
Untuk mengevaluasi kinerja sambungan tersebut, digunakan pendekatan *Finite Element Method* (FEM) yang mampu memberikan analisis komprehensif terhadap distribusi tegangan, deformasi, dan faktor

keamanan pada struktur geometri kompleks [7]. FEM diimplementasikan melalui *Finite Element Analysis* (FEA), yaitu simulasi numerik yang dapat memprediksi respons struktural secara sistematis dan kuantitatif.

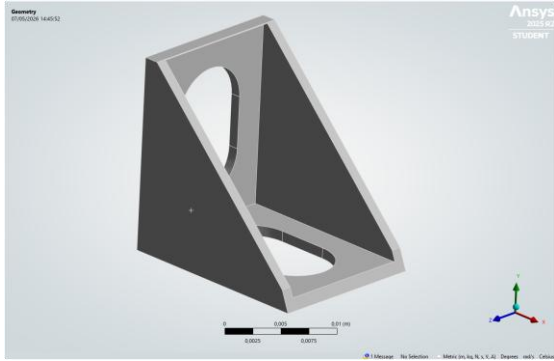
## Metode Penelitian

*Finite Element Method* (FEM), Bagian Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis *Finite Element Method* (FEM) untuk mengevaluasi kekuatan sambungan *angel corner* pada aluminium *profile* 2020 dengan variasi material. Analisis dilakukan untuk memperoleh distribusi tegangan, deformasi total, serta faktor keamanan akibat pembebanan statis sebesar 150 N. Pendekatan FEM dipilih karena mampu memprediksi perilaku struktur sebelum proses manufaktur [8].

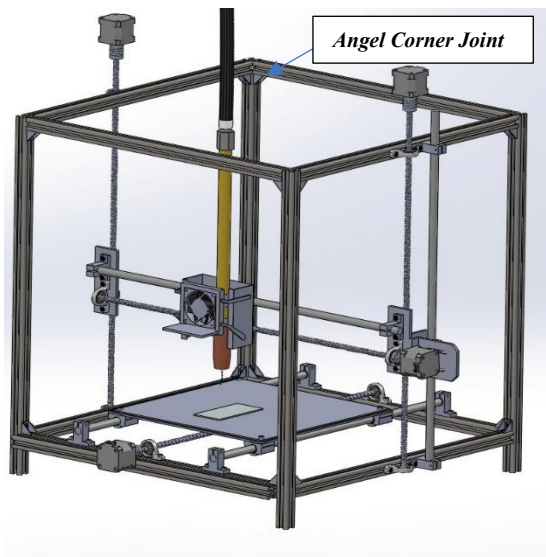
Pemodelan Geometri, Model 3D sambungan *angel corner* pada aluminium *profile* 2020 dibuat menggunakan perangkat lunak CAD, kemudian diekspor ke ANSYS dalam format STEP. Penyederhanaan geometri dilakukan tanpa menghilangkan bagian kritis pada area sambungan agar distribusi tegangan tetap akurat [9]. Gambar 1 menunjukkan hasil pemodelan geometri CAD, sedangkan Gambar 2 memperlihatkan pemodelan geometri di ANSYS. Adapun Gambar 3 menampilkan *assembly* keseluruhan desain rangka printer 3D logam dengan penekanan pada sambungan *angel corner*.



Gambar 1. Pemodelan Geometri CAD



Gambar 2. Pemodelan Geometri di ANSYS



Gambar 3. Pemodelan Assembly Desain 3D print logam

Material *Properties*, Untuk mengetahui pengaruh sifat mekanik terhadap *respons* struktur, tiga material digunakan sebagai input simulasi. Data sifat mekanik diperoleh dari literatur *material engineering* [10]. Tabel 1 menyajikan sifat mekanik utama dari Aluminium Alloy 6061-T6, Structural Steel S355, dan Stainless Steel 316L, meliputi nilai yield strength dan tensile strength.

*Meshing*, Studi *mesh convergence* dilakukan dengan variasi ukuran elemen 2 mm, 1.5 mm, 1 mm, dan 0.5 mm. Jumlah elemen berkisar antara 45.000 hingga 120.000 dengan nodes antara 60.000 hingga 160.000. Hasil perbandingan ditunjukkan pada Tabel 2, sedangkan visualisasi hubungan ukuran elemen terhadap tegangan von Mises maksimum ditampilkan pada Gambar 4. Grafik *Mesh Convergence Study*. Dari hasil tersebut

terlihat bahwa konvergensi tercapai pada ukuran mesh 1 mm dengan deviasi <3%, sehingga mesh 1 mm dipilih sebagai konfigurasi utama untuk simulasi FEM [11].

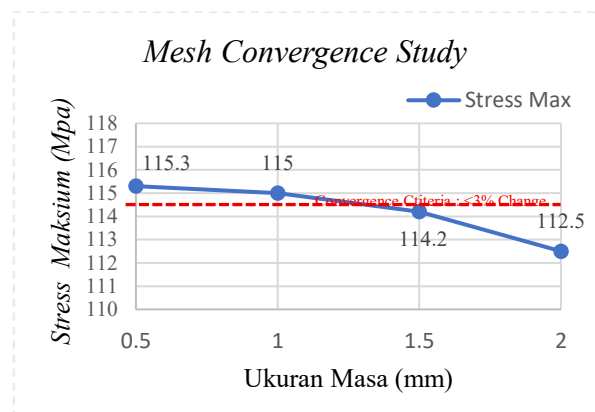
Tabel 1. Sifat mekanik material sambungan *angel corner joint*

Material	Aluminium Alloy 6061-T6	Structural Steel S355	Stainless Steel 316L
Yield Strength (Mpa)	275	355	290
Tensile strength (Mpa)	310	510	580
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2,70	7,85	8,0
Modulus Elastisitas (GPa)	68,9	210	193
Poisson Ratio	0,33	0,30	0,30

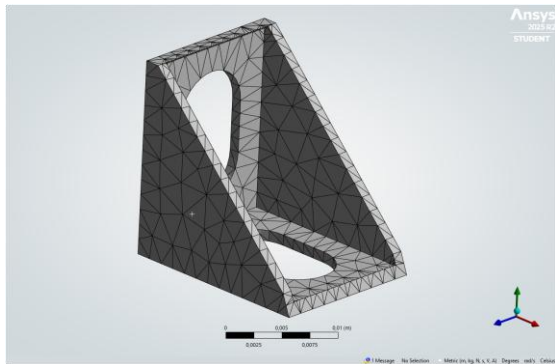
Selain itu, proses *meshing* pada sambungan *angle corner* ditunjukkan pada Gambar 5 sebagai representasi visual dari konfigurasi elemen yang digunakan.

Tabel 2. Mesh Convergence

Ukuran Mesh (mm)	Jumlah Elemen	Jumlah Nodes	Stress Maksimal (Mpa)	Error (%)
2	45.200	60.800	112,5	-
1,5	68.400	92.300	114,2	1,5
1	95.600	128.400	115	0,7
0,5	121.800	162.400	115,3	0,3

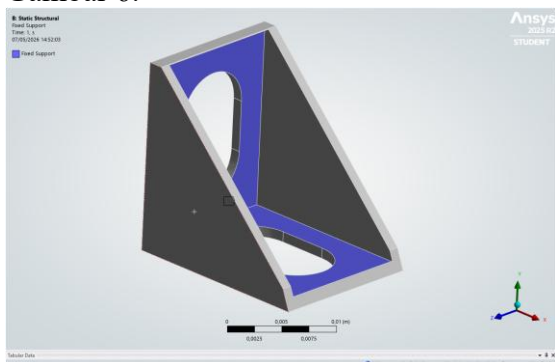


Gambar 4. Grafik *Mesh Convergence Study*



Gambar 5. Meshing Sambungan Angel Corner

Kondisi Batas dan Pembebanan, Dalam simulasi ini, kondisi batas ditetapkan dengan memberikan *fixed support* pada bagian bawah rangka yang bersentuhan langsung dengan lantai untuk merepresentasikan keadaan tumpuan nyata. Konfigurasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Fixed Support Pada Sambungan Angle Corner

Selain itu, beban statis sebesar 150 N tidak hanya diterapkan pada satu sumbu, melainkan pada dua sumbu utama sesuai orientasi sambungan *angle corner joint*. Hal ini dilakukan karena setiap sambungan memiliki arah pemasangan berbeda (atas, bawah, samping), sehingga distribusi beban aktual tidak dapat direpresentasikan dengan gaya tunggal. Dengan pendekatan multi-sumbu, simulasi FEM mampu menggambarkan kondisi operasional lebih realistis, di mana rangka printer 3D logam harus menahan kombinasi beban dari mesin las MIG dan panel elektrik yang terpasang di bagian atas [12]. Arah sumbu

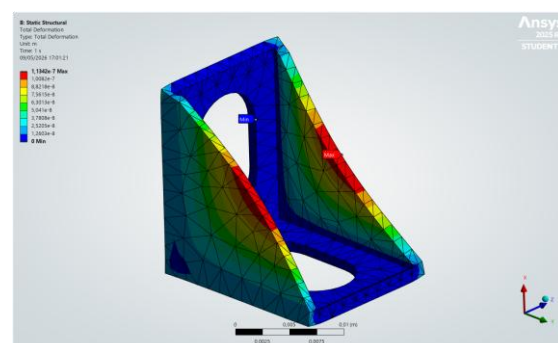
pembebanan aktual ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Titik Force Sambungan Angel Corner

Parameter Analisis, Dalam penelitian ini, parameter yang dianalisis meliputi tiga aspek utama untuk mengevaluasi kinerja struktural sambungan angel corner pada rangka printer 3D logam berbasis MIG.

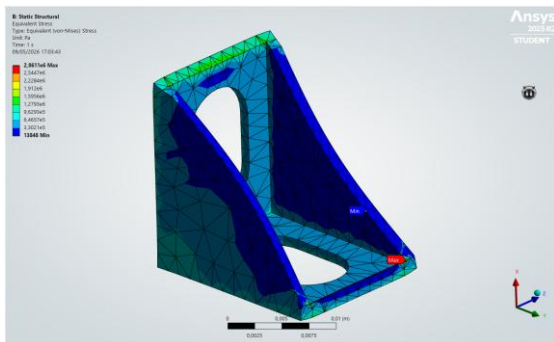
Total Deformasi, digunakan untuk mengevaluasi perubahan bentuk, posisi, atau dimensi komponen akibat pembebanan statis. Semakin kecil nilai deformasi, semakin tinggi kekakuan struktural komponen. Analisis deformasi penting karena menunjukkan kemampuan material dalam mempertahankan stabilitas bentuk ketika menerima beban eksternal [13]. Visualisasi distribusi deformasi pada sambungan *angle corner* ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Total Deformasi

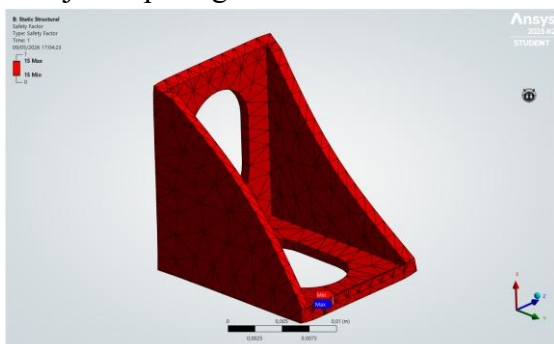
Equivalent Stress, dihitung menggunakan kriteria *Von Mises* untuk mengetahui distribusi tegangan maksimum

pada komponen. Parameter ini digunakan untuk menentukan apakah material masih berada dalam kondisi elastis atau sudah mendekati plastis. Equivalent stress merupakan penyederhanaan dari kondisi tegangan utama yang bekerja pada suatu titik struktur, sehingga memudahkan evaluasi terhadap potensi kegagalan [14]. Distribusi tegangan hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Equivalent Stress

*Safety Factor*, digunakan untuk menilai margin keamanan komponen terhadap beban kerja. Faktor keamanan dihitung dengan membandingkan kekuatan luluh material terhadap tegangan maksimum yang terjadi. Nilai safety factor yang lebih besar dari 1,5 umumnya dianggap aman untuk aplikasi mekanik, sedangkan nilai mendekati 1 menunjukkan risiko kegagalan lebih tinggi. Definisi ini sesuai dengan konsep faktor keamanan sebagai rasio antara kekuatan batas material dengan tegangan tertinggi yang bekerja pada komponen [15]. Distribusi nilai *safety factor* hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 10.



Gambar 10. Safety Factor

Landasan teori, yang digunakan dalam analisis ini meliputi:

Tegangan (Stress), dirumuskan sebagai:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

menunjukkan bahwa tegangan berbanding lurus dengan gaya ( $F$ ) dan berbanding terbalik dengan luas penampang ( $A$ ).

Regangan (Strain), dinyatakan sebagai:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

yang menggambarkan perubahan panjang relatif terhadap panjang awal material akibat pembebanan. Von Mises Stress, digunakan untuk menyederhanakan kondisi multiaxial stress menjadi satu parameter ekuivalen:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3)$$

*Safety Factor*, Material dianggap aman jika  $\sigma_{vm} < \sigma_y$  (yield strength). Safety Factor (SF), dirumuskan sebagai:

$$SF = \frac{\sigma_y}{\sigma_{vm}} \quad (4)$$

yang menunjukkan margin keamanan material terhadap beban kerja. Nilai  $SF > 1,5$  umumnya dianggap aman untuk aplikasi mekanik.

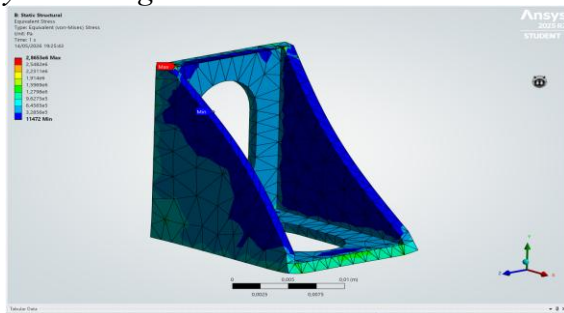
Dengan dasar teori ini, penelitian bertujuan untuk menganalisis distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan sambungan *angle corner joint* pada rangka printer 3D logam berbasis MIG, sehingga dapat menentukan material yang paling optimal dalam menjaga stabilitas rangka dan akurasi proses pencetakan logam.

## Hasil dan Pembahasan

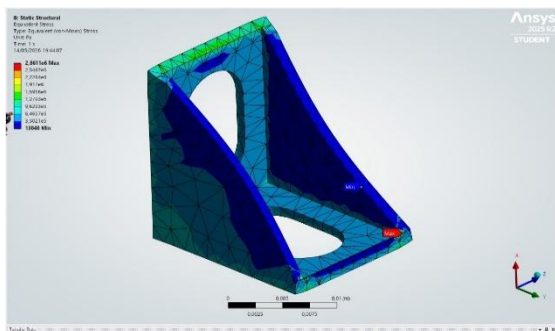
Analisis, dilakukan menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method) dengan perangkat lunak ANSYS untuk mengevaluasi karakteristik mekanik sambungan *angel corner* pada aluminium profile 2020. Parameter utama yang

dianalisis meliputi tegangan *von Mises*, deformasi total, dan faktor keamanan (*Safety Factor*).

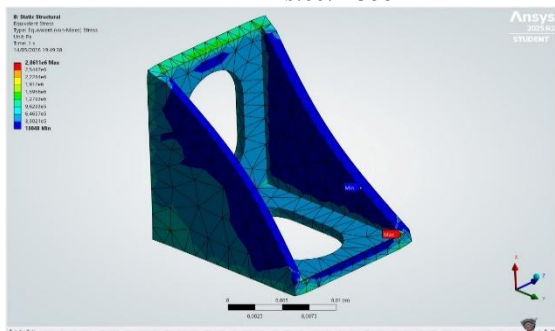
*Von Mises Stress*, Analisis tegangan *von Mises* digunakan untuk mengevaluasi integritas sambungan *angel corner* di bawah beban statis sebesar 150 N. Tegangan *von Mises* dipilih karena mampu menyederhanakan kondisi multiaxial stress menjadi satu parameter ekuivalen, sehingga memudahkan perbandingan dengan nilai *yield strength* material.



Gambar 11. Hasil simulasi *von Mises* pada aluminium alloy 6061



Gambar 12. Hasil simulasi *von Mises* pada struktural steel S355



Gambar 13. Hasil simulasi *von Mises* pada stainless steel 316L

Hasil simulasi tegangan *von Mises* untuk masing-masing material ditunjukkan pada Gambar 11 (Aluminium Alloy 6061-T6), Gambar 12 (Structural Steel S355), dan Gambar 13 (Stainless Steel 316L). Perbandingan kuantitatif hasil analisis

ditampilkan pada Tabel 3, yang memperlihatkan bahwa seluruh material masih berada dalam kondisi elastis.

Tabel 3. Hasil Analisis *Von Mises Stress*

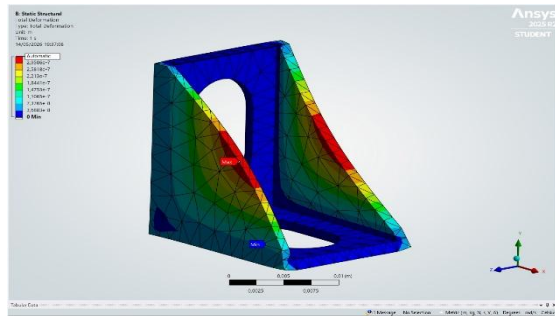
Material	<i>Von Mises Stress (Mpa)</i>	<i>Yield Strength (Mpa)</i>	Kondisi
<i>Aluminium Alloy 6061-T6</i>	92,5	240	Elastis
<i>Structural Steel S355</i>	88,2	383	Elastis
<i>Stainless Steel 316L</i>	90,7	205	Elastis

Distribusi tegangan, maksimum pada ketiga material menunjukkan pola konsentrasi tegangan yang serupa, yaitu terkonsentrasi pada area sambungan sudut (*corner joint*) yang menerima beban langsung. *Aluminium Alloy 6061-T6* mencatat tegangan maksimum sebesar 92,5 MPa, relatif lebih tinggi dibandingkan baja, namun masih jauh di bawah *yield strength* 240 MPa. *Structural Steel S355* menghasilkan tegangan maksimum terendah yaitu 88,2 MPa, dengan margin keamanan yang besar terhadap *yield strength* 383 MPa. *Stainless Steel 316L* berada di posisi menengah dengan tegangan 90,7 MPa, namun karena *yield strength*-nya hanya 205 MPa, margin keamanannya lebih terbatas dibandingkan baja.

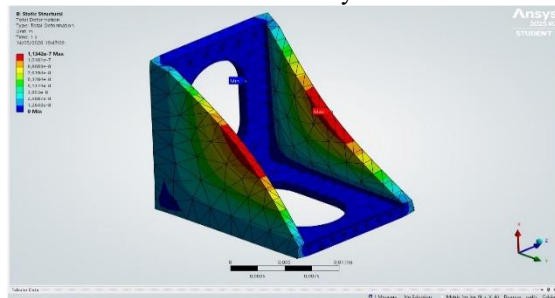
Secara keseluruhan, nilai tegangan maksimum pada ketiga material masih berada di bawah batas luluh masing-masing, sehingga struktur tetap berada dalam kondisi elastis dan aman dari deformasi plastis. Namun, perbedaan *yield strength* antar material memberikan implikasi berbeda terhadap desain: baja S355 memiliki kapasitas menahan beban lebih tinggi, aluminium unggul dari sisi ringan namun margin keamanan lebih kecil, sedangkan

stainless steel menawarkan ketahanan korosi dengan kompromi pada kekakuan.

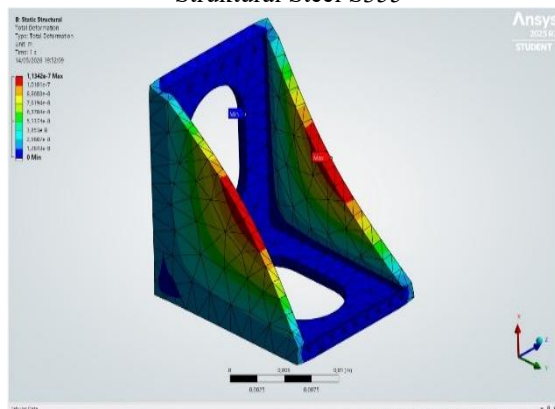
Deformasi, Analisis deformasi total digunakan untuk mengevaluasi respons sambungan *angel corner* terhadap beban statis sebesar 150 N. Parameter ini penting karena menunjukkan kemampuan material dalam mempertahankan bentuk dan kekakuan struktur ketika menerima beban eksternal.



Gambar 14. Hasil simulasi Deformasi pada Aluminium Alloy 6061



Gambar 15. Hasil simulasi Deformasi pada Struktural Steel S355



Gambar 16. Hasil simulasi Deformasi pada stainless steel 316L

Distribusi deformasi menunjukkan bahwa *Structural Steel S355* memiliki nilai deformasi terkecil yaitu 0,065 mm, menandakan tingkat kekakuan paling tinggi. *Aluminium Alloy 6061-T6* menghasilkan deformasi terbesar yaitu 0,145 mm, sesuai dengan sifatnya yang lebih ringan dan

elastis. *Stainless Steel 316L* berada di posisi menengah dengan deformasi 0,102 mm.

Tabel 4. Hasil Analisis Deformasi

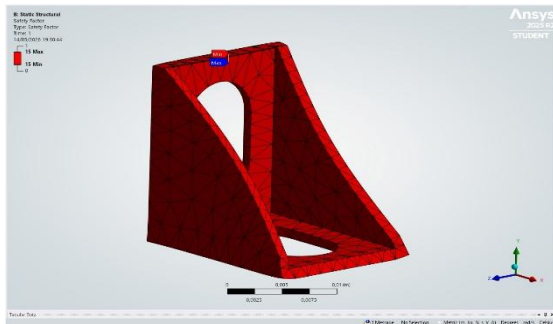
Material	Deformasi (mm)	Batas Toleransi (mm)	Kondisi
<i>Aluminium Alloy 6061-T6</i>	0,145	1,0	Aman
<i>Structural Steel S355</i>	0,065	1,0	Aman
<i>Stainless Steel 316L</i>	0,102	1,0	Aman

Peta deformasi memperlihatkan bahwa area sambungan sudut mengalami pergeseran paling signifikan, ditunjukkan dengan gradien warna biru-hijau pada hasil simulasi. Walaupun seluruh nilai deformasi masih berada dalam batas aman ( $< 1$  mm), perbedaan antar material memberikan implikasi desain. *Structural Steel S355* lebih cocok untuk aplikasi yang menuntut kekakuan tinggi dan stabilitas jangka panjang. Sedangkan *Aluminium 6061-T6* dapat dipilih untuk konstruksi ringan, namun harus memperhatikan margin deformasi agar tidak mengganggu presisi *printer* dan *Stainless Steel 316L* menawarkan kompromi antara kekakuan dan ketahanan korosi, meskipun deformasi lebih besar dibanding baja.

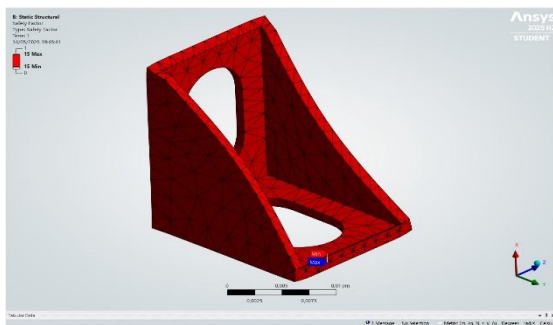
Secara keseluruhan, hasil deformasi menegaskan bahwa pemilihan material sangat memengaruhi kekakuan sambungan. Baja S355 unggul dalam kekakuan, aluminium unggul dalam bobot ringan, dan *stainless steel* unggul dalam ketahanan lingkungan.

*Safety Factor*, Faktor keamanan (*Safety Factor*) digunakan untuk menilai margin keamanan sambungan *angel corner* terhadap beban kerja. Nilai ini dihitung dengan membandingkan *yield strength* material terhadap tegangan maksimum yang

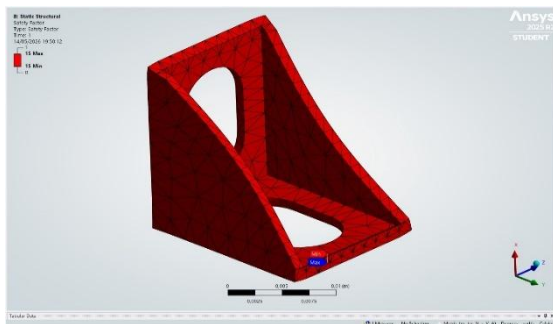
terjadi. Semakin besar nilai faktor keamanan, semakin tinggi keandalan struktur dalam menahan beban tanpa risiko kegagalan. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 17 (Aluminium Alloy 6061-T6), Gambar 18 (Structural Steel S355), dan Gambar 19 (Stainless Steel 316L). Perbandingan kuantitatif hasil analisis ditampilkan pada Tabel 5, yang memperlihatkan bahwa seluruh material memiliki nilai faktor keamanan di atas batas minimum 1,5 sehingga dapat dikategorikan aman.



Gambar 17. Hasil simulasi Safety Factor pada Aluminium Alloy 6061 T6



Gambar 18. Hasil simulasi Safety Factor pada Struktural Steel S355



Gambar 19. Hasil simulasi Safety Factor Stainless Steel

Hasil simulasi, menunjukkan bahwa Structural Steel S355 memiliki faktor keamanan tertinggi yaitu 4,34, menandakan margin keamanan yang sangat besar

terhadap beban multi-sumbu 150 N. Aluminium Alloy 6061-T6 memiliki faktor keamanan sebesar 2,59, lebih rendah dibanding baja, namun masih di atas batas minimum 1,5 sehingga tetap aman digunakan. Stainless Steel 316L berada di posisi menengah dengan nilai 2,26, cukup aman tetapi margin keamanannya lebih terbatas dibanding S355.

Tabel 5. Hasil Analisis *Safety Factor*

Material	<i>Safety Factor</i>	Batas Minimum	Kondisi
Aluminium Alloy 6061-T6	2,59	1,5	Aman
Structural Steel S355	4,34	1,5	Sangat Aman
Stainless Steel 316L	2,26	1,5	Aman

Perbedaan ini tidak hanya relevan secara teoritis, tetapi juga berimplikasi langsung pada operasional printer 3D logam berbasis MIG. Rangka harus mampu menahan beban gabungan dari mesin las MIG dan panel elektrik tanpa kehilangan rigiditas. Material dengan modulus elastisitas tinggi seperti S355 menghasilkan deformasi lebih kecil, sehingga posisi torch MIG tetap presisi selama proses pencetakan. Sebaliknya, Al6061-T6 meskipun lebih ringan, menghasilkan deformasi lebih besar yang berpotensi menurunkan akurasi jalur cetak. 316L menawarkan ketahanan korosi, namun kompromi pada kekakuan harus diperhitungkan.

Peta distribusi faktor keamanan memperlihatkan bahwa area sambungan sudut merupakan titik kritis dengan nilai safety factor paling rendah. Hal ini konsisten dengan lokasi konsentrasi tegangan pada analisis Von Mises Stress. Dengan demikian, pemilihan material tidak hanya mempertimbangkan kekuatan luluh, tetapi juga hubungan antara modulus elastisitas, deformasi, dan akurasi proses pencetakan logam.

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi elemen hingga dengan pembebanan multi-sumbu sebesar 150 N, seluruh variasi material sambungan *angle corner* joint masih berada dalam kondisi aman karena tegangan von Mises yang terjadi berada di bawah batas luluh masing-masing material. Distribusi tegangan maksimum terkonsentrasi pada area sambungan sudut, namun tidak menimbulkan deformasi plastis.

Perbedaan sifat material memberikan pengaruh signifikan terhadap deformasi dan faktor keamanan. Structural Steel S355 menunjukkan performa terbaik dengan deformasi terkecil (0,065 mm) dan faktor keamanan tertinggi (4,34), sehingga paling sesuai untuk menjaga rigiditas rangka dan akurasi posisi torch MIG. Aluminium Alloy 6061-T6 memiliki deformasi lebih besar (0,145 mm) dengan faktor keamanan moderat (2,59), namun unggul dari sisi bobot ringan sehingga cocok untuk konstruksi portabel dengan perhatian khusus pada margin deformasi. Stainless Steel 316L berada di posisi menengah (deformasi 0,102 mm, faktor keamanan 2,26), menawarkan ketahanan korosi yang relevan untuk lingkungan ekstrem, meskipun kompromi pada kekakuan harus diperhitungkan.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa pemilihan material rangka printer 3D logam berbasis MIG berimplikasi langsung terhadap akurasi cetak, stabilitas torch, dan keandalan sistem kontrol elektrik. S355 direkomendasikan untuk aplikasi yang menuntut kekuatan dan stabilitas jangka panjang, Al6061-T6 untuk konstruksi ringan, dan 316L untuk lingkungan korosif.

Untuk pengembangan selanjutnya, penelitian dapat diperluas dengan analisis beban dinamis, kelelahan material, serta validasi eksperimental agar hasil lebih representatif terhadap kondisi operasional nyata printer 3D logam.

## Referensi.

- [1] N.W. Ishlah, S.J. Rega, T. Rohman, dan S. Subekti, "Analysis of air-to-water converter frame using ANSYS simulation," *JTTM: Jurnal Terapan Teknik Mesin*, vol. 5, no. 2, pp. 274–279, 2024.
- [2] S.G. Lawolo, dkk., "Analisis Kekuatan Frame Trailer menggunakan Finite Element Method," *Journal of Mechanical and Electrical Technology*, vol. 4, no. 2, 2025.
- [3] J. Luo, W. Zhou, B. Du, D. Li, dan W. Yao, "Multi-Material Topology Optimization of 2D Structures Using Convolutional Neural Networks," *CMES – Computer Modeling in Engineering and Sciences*, vol. 140, no. 2, pp. 1919–1947, 2024.
- [4] D. Banothu, P. Kumar, dan R. Reddy, "Parametric FEA analysis of lattice and block plate bone implants," *Results in Engineering*, vol. 25, 103908, 2025.
- [5] C.A.R. Duarte dan A. Alves, "Physics-informed neural networks for 3D transient thermal simulation of MIG welding," *Results in Engineering*, vol. 29, 109549, Mar. 2026.
- [6] "Fracture toughness and microstructural analysis of rotary friction welded S355J2 and SS316L steels for critical applications," *Journal of Advanced Joining Processes*, vol. 10, 100244, Nov. 2024.
- [7] W.M.S.W. Fauzi, H. Rashid, dan M.H. Azman, "Development of RhiNO v2.0: An Enhanced Single User Paddock Stand," *JAEDS*, vol. 2, no. 1, 2022.
- [8] A.B. Prasetyo dan K.A. Sekarjati, "Desain dan Analisis Frekuensi Natural Rangka Mesin Penyanggul Menggunakan Metode FEA," *JRST*, vol. 6, no. 2, pp. 181–188, 2022.

- [9] R. Alda, I.A. Ariesta, S.R. Aditya, A. Rahayu, F. Nurwimbo, dan A.B. Prasetyo, “Desain dan Analisis Struktur Variasi Paddock Motor Menggunakan Metode Elemen Hingga,” *Armatur*, vol. 7, no. 2, 2023.
- [10] I.M. Ilyasa, dkk., “Analisis Kekuatan Struktur pada Desain Traction Rod Kereta Api Lokomotif dengan Metode FEA,” *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 8, no. 1, 2024.
- [11] H. Zhang, Y. Li, dan K. Wang, “Finite element analysis of aluminum alloy joints under multi-axial loading,” *Engineering Structures*, vol. 295, 116589, 2025.
- [12] M. Singh dan R. Patel, “Comparative FEM study of stainless steel and aluminum alloys for structural frames,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 80, pp. 145–152, 2025.
- [13] L. Chen, J. Zhou, dan Y. Huang, “Structural performance of welded steel frames for additive manufacturing equipment,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 92, pp. 310–320, 2024.
- [14] K. Nakamura dan T. Saito, “Dynamic FEM analysis of 3D printer frames under multi-directional loads,” *Additive Manufacturing Letters*, vol. 5, 100123, 2023.
- [15] P. Kumar dan S. Rao, “Optimization of corner joints in aluminum profiles using FEM,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 242, 107012, 2026.