

Analisis *Existing Jig Assembly Base Stator* dengan Metode *FEA*

RECEIVED
01 April 2026

REVISED
23 April 2026

ACCEPTED
02 Mei 2026

PUBLISHED
31 Mei 2026

Yohanes Baptista Wahyu KJW^{1*}, Benidiktus Tulung Prayoga², Widia Setiawan³, Nugroho Santoso⁴, Harjono⁵

^{1,2,3,4,5} Departemen Teknik Mesin, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.

* yohanesbaptistawahyukuncarajatiwitaka1504@mail.ugm.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi *existing jig assembly* pada proses pemasangan *seal Base Stator K3V* menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)* sebagai dasar evaluasi kinerja struktur sebelum dilakukan pengembangan desain. Analisis dilakukan untuk mengetahui distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan (*safety factor*) pada komponen *jig* saat menerima beban kerja aktual dari sistem pneumatik. Metodologi penelitian diawali dengan identifikasi spesifikasi dan geometri *jig assembly existing*, dilanjutkan dengan pembuatan model tiga dimensi menggunakan perangkat lunak CAD. Simulasi numerik dilakukan menggunakan ANSYS Workbench dengan material utama komponen *jig* berupa baja karbon struktural. Kondisi pembebanan ditentukan berdasarkan gaya yang dihasilkan oleh silinder pneumatik dengan tekanan kerja 4 bar, sedangkan kondisi batas (*boundary condition*) disesuaikan dengan kondisi aktual pemasangan *jig* pada mesin *assembly*. Parameter keluaran yang dianalisis meliputi *total deformation*, *equivalent stress (Von Mises stress)*, dan *safety factor*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi tegangan terbesar terjadi pada area yang menerima kontak langsung dengan gaya pembebanan dan pada bagian yang memiliki perubahan geometri. Nilai deformasi yang terjadi masih berada dalam batas yang dapat diterima sehingga tidak memengaruhi fungsi *jig* selama proses *assembly*. Selain itu, nilai tegangan maksimum yang diperoleh masih berada di bawah batas luluh material yang digunakan, sehingga menghasilkan nilai *safety factor* yang memenuhi kriteria desain aman untuk operasi produksi. Berdasarkan hasil analisis *FEA*, dapat disimpulkan bahwa *existing jig assembly Base Stator* memiliki kekuatan struktur yang memadai untuk menahan beban kerja selama proses *assembly*. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan dalam evaluasi dan pengembangan desain *jig* pada tahap perbaikan berikutnya guna meningkatkan efektivitas dan keandalan proses produksi.

Kata kunci: *Finite Element Analysis (FEA)*, *Jig Assembly*, *Base Stator*, Tegangan *Von Mises*, *Safety factor*.

1. Pendahuluan

Perkembangan industri manufaktur menuntut perusahaan untuk terus meningkatkan produktivitas, kualitas produk, dan keandalan proses produksi guna memenuhi kebutuhan pasar yang semakin kompetitif. Salah satu faktor yang memengaruhi keberhasilan proses produksi adalah penggunaan *jig* dan *fixture* yang mampu menjamin ketepatan posisi komponen selama proses perakitan (*assembly*) [8]. *Jig* yang memiliki kekuatan dan kekakuan struktur yang memadai mampu menjaga stabilitas proses, mengurangi variasi hasil produksi, serta meminimalkan terjadinya cacat produk akibat ketidaktepatan posisi komponen [1].

PT Astra Otoparts Tbk Divisi Nusametal merupakan perusahaan manufaktur yang memproduksi berbagai komponen otomotif, salah satunya *Base Stator K3V*. Pada proses *assembly seal Base Stator* digunakan sebuah *jig* sebagai alat bantu untuk memastikan posisi komponen tetap sesuai selama proses pemasangan *seal*. Seiring dengan meningkatnya tuntutan kapasitas produksi dan kebutuhan akan

kualitas produk yang konsisten, struktur *jig* harus mampu mempertahankan kinerjanya meskipun menerima pembebanan secara berulang selama proses produksi [2]. Beban operasional yang bekerja secara terus-menerus berpotensi menyebabkan deformasi maupun konsentrasi tegangan pada bagian tertentu sehingga dapat menurunkan akurasi proses, memperpendek umur pakai alat, dan meningkatkan risiko kegagalan struktur.

Evaluasi terhadap kondisi struktur *jig* menjadi langkah penting untuk memastikan bahwa alat masih memenuhi persyaratan kekuatan dan keamanan selama digunakan. Namun, evaluasi secara eksperimental terhadap komponen manufaktur sering kali memerlukan biaya, waktu, dan penghentian proses produksi yang relatif besar. Oleh karena itu, diperlukan metode analisis yang mampu memprediksi respons struktur secara efisien sebelum dilakukan modifikasi maupun pengembangan desain [3].

Salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengevaluasi perilaku mekanik suatu struktur adalah *Finite Element Analysis (FEA)*. Metode ini memungkinkan distribusi tegangan, deformasi, serta faktor keamanan komponen dianalisis secara numerik dengan tingkat akurasi yang tinggi berdasarkan kondisi pembebanan aktual [4]. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa FEA mampu digunakan secara efektif untuk mengevaluasi kekuatan struktur pada peralatan manufaktur, mengidentifikasi daerah dengan konsentrasi tegangan tinggi, serta mendukung proses optimasi desain sehingga dapat mengurangi risiko kegagalan struktur sebelum implementasi di lapangan.

Meskipun FEA telah banyak diterapkan pada analisis berbagai komponen mekanik, kajian terhadap kondisi *existing jig assembly* sebagai dasar evaluasi sebelum dilakukan pengembangan desain masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian lebih berfokus pada optimasi atau modifikasi desain tanpa diawali dengan analisis terhadap performa struktur awal (*baseline*). Padahal, informasi mengenai distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan pada kondisi *existing* sangat diperlukan untuk menentukan apakah desain yang digunakan masih memenuhi kriteria kekuatan atau memerlukan perbaikan lebih lanjut. Selain itu, hasil analisis kondisi *existing* dapat digunakan untuk mengidentifikasi lokasi kritis yang menjadi prioritas pada tahap pengembangan desain berikutnya.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi *existing jig assembly Base Stator* menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)*. Parameter yang dianalisis meliputi *total deformation*, *equivalent stress (Von Mises stress)*, dan *safety factor* pada kondisi pembebanan aktual [5]. Hipotesis penelitian ini adalah bahwa struktur *existing jig assembly Base Stator* masih mampu menahan beban kerja operasional dengan nilai tegangan yang berada di bawah batas luluh material serta memiliki faktor keamanan yang memenuhi kriteria desain aman. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar evaluasi teknis serta referensi dalam pengembangan desain *jig* guna meningkatkan keandalan alat, kualitas proses *assembly*, dan keberlanjutan peningkatan produktivitas di lingkungan manufaktur.

2. Metode Penelitian

2.1. Bahan Penelitian

Bahan penelitian yang digunakan dalam studi ini berupa model *existing jig assembly Base Stator* yang digunakan pada proses pemasangan *seal* di line produksi PT Astra Otoparts Tbk Divisi Nusametal. Analisis dilakukan secara numerik menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)* untuk mengevaluasi kemampuan struktur *jig* dalam menerima beban kerja selama proses *assembly*.

Material yang digunakan pada komponen yang dianalisis adalah baja karbon menengah S45C. Material S45C dipilih karena memiliki kekuatan mekanik yang baik, ketahanan terhadap beban tekan dan geser yang tinggi, serta umum digunakan pada komponen mesin yang menerima pembebanan berulang. Sifat mekanik material yang digunakan dalam simulasi meliputi massa jenis 7.850 kg/m^3 , *modulus elastisitas* 205 GPa, *rasio Poisson* 0,29, tegangan luluh (*yield strength*) sebesar 343 MPa, dan tegangan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*) sebesar 569 Mpa [6]. Data sifat material tersebut digunakan sebagai parameter masukan pada proses simulasi *FEA*.

Objek penelitian terdiri atas satu unit existing *jig assembly Base Stator* yang dimodelkan dalam bentuk tiga dimensi menggunakan perangkat lunak CAD. Model kemudian diekspor ke perangkat lunak ANSYS Workbench untuk dilakukan analisis elemen hingga. Analisis difokuskan pada komponen *jig* yang menerima pembebanan langsung selama proses *assembly*.

Pembebanan pada simulasi berasal dari gaya kerja silinder pneumatik yang digunakan pada proses pemasangan *seal*. Silinder pneumatik memiliki diameter bore 50 mm dengan tekanan kerja sebesar 4 bar. Berdasarkan spesifikasi tersebut diperoleh gaya teoritis sebesar 785 N yang digunakan sebagai beban pada simulasi. Selain itu, kondisi batas (*boundary condition*) ditentukan sesuai kondisi aktual pemasangan *jig* pada mesin *assembly* sehingga hasil simulasi dapat merepresentasikan kondisi kerja yang sebenarnya [9].

Data yang digunakan dalam penelitian meliputi data geometri komponen, sifat mekanik material S45C, spesifikasi sistem pneumatik, serta parameter simulasi yang digunakan untuk memperoleh nilai total *deformation*, *equivalent stress (Von Mises stress)*, dan *safety factor* sebagai indikator kinerja struktur existing *jig assembly Base Stator*.

2.2. Metode

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan simulasi numerik berbasis *Finite Element Analysis (FEA)* untuk mengevaluasi kekuatan struktur existing *jig assembly Base Stator*. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench dengan tujuan memperoleh distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan pada kondisi pembebanan aktual.

Tahapan penelitian diawali dengan pengumpulan data teknis yang meliputi geometri existing *jig*, spesifikasi material S45C, serta spesifikasi sistem pneumatik yang digunakan pada proses *assembly*. Selanjutnya dilakukan pemodelan tiga dimensi (3D) menggunakan perangkat lunak *Computer Aided Design (CAD)*. Model yang telah dibuat kemudian diekspor ke ANSYS Workbench untuk dilakukan proses simulasi [4].

Pada tahap simulasi, material S45C diterapkan pada model dengan sifat mekanik sesuai data material. Selanjutnya dilakukan proses *meshing* untuk membagi model menjadi elemen-elemen kecil sehingga perhitungan numerik dapat dilakukan. Kualitas mesh dievaluasi untuk memastikan hasil simulasi memiliki tingkat akurasi yang memadai [5].

Kondisi batas (*boundary condition*) ditentukan berdasarkan kondisi aktual penggunaan *jig* pada mesin *assembly*. Area yang terhubung secara permanen dengan struktur mesin diberikan kondisi *fixed support*, sedangkan pembebanan diberikan pada area kontak yang menerima gaya dari sistem pneumatik [9]. Besarnya gaya dihitung berdasarkan tekanan kerja pneumatik sebesar 4 bar dan diameter *bore* silinder 50 mm sehingga diperoleh gaya teoritis sebesar 785 N.

Analisis yang dilakukan merupakan analisis statik struktural (*static structural analysis*) dengan asumsi material bersifat homogen, isotropik, dan berperilaku elastis linier. Parameter keluaran yang diamati meliputi total *deformation* untuk mengetahui besarnya perpindahan yang terjadi pada struktur, *equivalent stress (Von Mises stress)* untuk mengevaluasi distribusi tegangan, serta *safety factor* untuk menentukan tingkat keamanan desain terhadap kegagalan material [13], [14], [15].

Hasil simulasi kemudian dianalisis dan dibandingkan dengan sifat mekanik material S45C, khususnya nilai *yield strength*. Kriteria desain dinyatakan aman apabila nilai tegangan maksimum yang terjadi lebih rendah daripada tegangan luluh material dan nilai *safety factor* lebih besar dari satu. Berdasarkan hasil tersebut dilakukan evaluasi terhadap kemampuan existing *jig assembly Base Stator* dalam menahan beban kerja selama proses *assembly* serta identifikasi area kritis yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan.

2.3. Analisis Data

Analisis Data hasil simulasi dianalisis secara deskriptif berdasarkan parameter keluaran yang diperoleh dari perangkat lunak ANSYS Workbench, yaitu *total deformation*, *equivalent stress* (*Von Mises stress*), dan *safety factor*. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan struktur *existing jig assembly Base Stator* dalam menahan beban kerja yang diberikan oleh sistem pneumatik selama proses *assembly*.

Nilai *equivalent stress* yang diperoleh dari simulasi dibandingkan dengan tegangan luluh (*yield strength*) material S45C untuk menentukan tingkat keamanan struktur. Kriteria desain dinyatakan aman apabila nilai *equivalent stress* maksimum lebih kecil daripada *yield strength* material dan nilai *safety factor* lebih besar dari 1 [6]. Selain itu, nilai *total deformation* digunakan untuk mengevaluasi kekakuan struktur dan memastikan deformasi yang terjadi tidak mengganggu fungsi *jig* selama proses *assembly* [7].

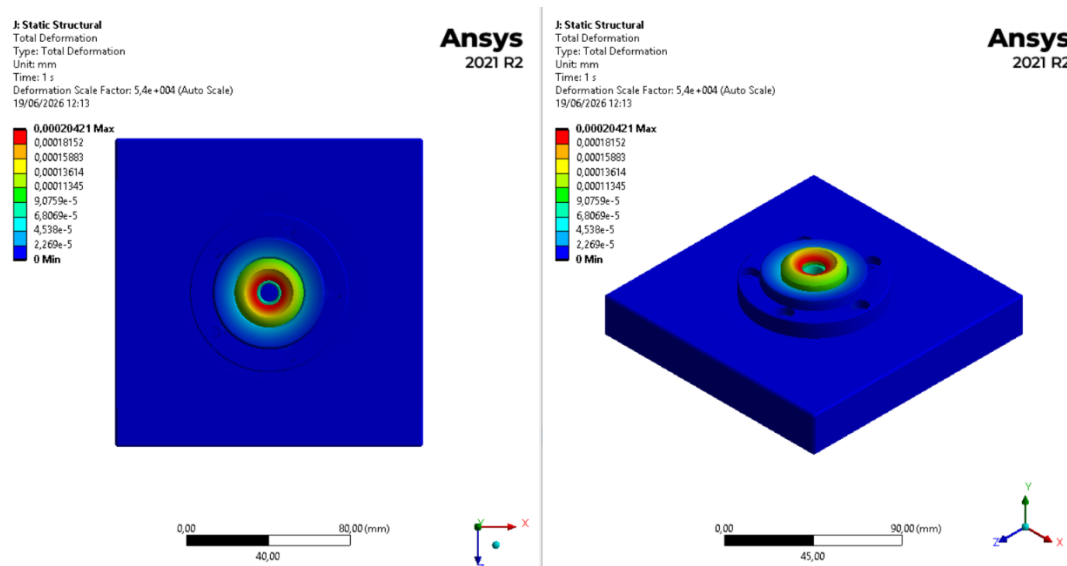
Interpretasi hasil simulasi dilakukan dengan mengidentifikasi lokasi terjadinya tegangan maksimum, deformasi maksimum, dan distribusi faktor keamanan pada seluruh komponen yang dianalisis. Hasil tersebut kemudian digunakan untuk menilai kelayakan desain *existing jig assembly Base Stator* sebagai dasar evaluasi dan pengembangan desain pada penelitian selanjutnya.

Seluruh proses simulasi dan pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench 2024 R2. Hasil yang diperoleh disajikan dalam bentuk kontur warna, grafik, dan nilai numerik untuk memudahkan analisis serta pembahasan performa struktur *jig* terhadap kondisi pembebanan yang diberikan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Total deformation

Hasil Analisis *total deformation* dilakukan untuk mengetahui besarnya perpindahan yang terjadi pada struktur *existing jig assembly Base Stator* akibat pembebanan dari sistem pneumatik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa deformasi maksimum terjadi pada area yang menerima pembebanan secara langsung, sedangkan bagian yang terhubung dengan *fixed support* memiliki nilai deformasi mendekati nol.



Gambar 1. Hasil *total deformation*

Berdasarkan Gambar 1. *Hasil Total Deformation* menunjukkan bahwa deformasi maksimum yang terjadi pada *jig assembly* sebesar $2,0421 \times 10^{-7}$ m dan terletak pada area lubang pusat yang menerima pembebanan secara langsung. Distribusi deformasi terlihat menyebar secara radial dari titik

pembebanan menuju area luar komponen dengan nilai yang semakin menurun. Sebagian besar struktur berada pada kondisi deformasi yang sangat kecil, ditunjukkan oleh dominasi warna biru pada hasil simulasi. Nilai deformasi maksimum yang hanya mencapai **0,204 μm** menunjukkan bahwa struktur *jig* memiliki kekakuan yang sangat baik sehingga tidak mengalami perubahan bentuk yang dapat mempengaruhi akurasi proses *assembly*. Dengan demikian, desain *jig* hasil modifikasi mampu mempertahankan stabilitas dimensi selama proses operasi dan memenuhi persyaratan kekuatan struktural yang dibutuhkan pada proses *assembly seal* base stator.

Tabel 1 menunjukkan rekapitulasi hasil simulasi *total deformation* pada *existing jig assembly Base Stator*.

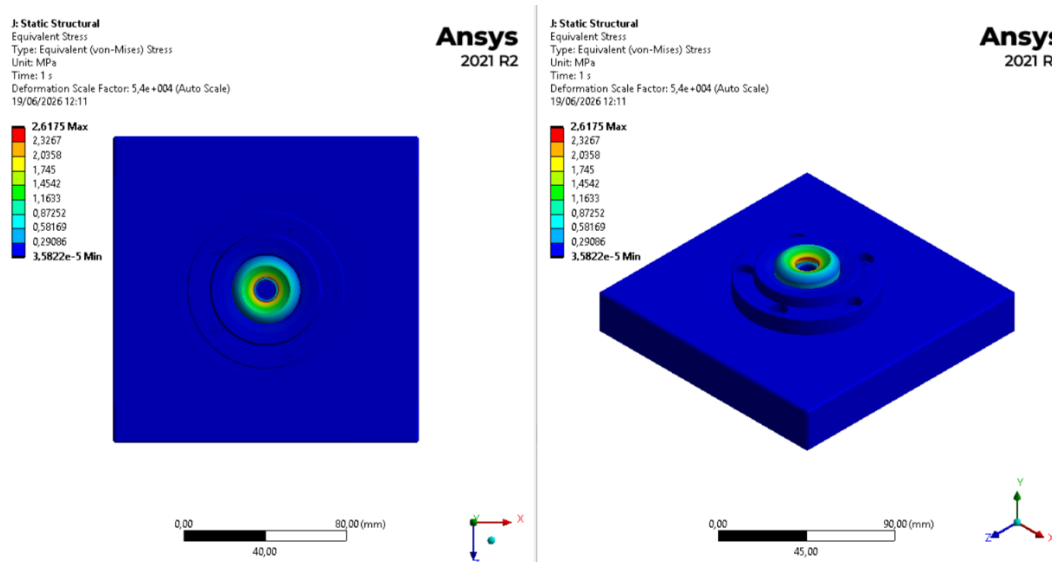
Tabel 1. Hasil simulasi *total deformation*

Parameter	Nilai
Deformasi Minimum	0 mm
Deformasi Maksimum	0,00020421 mm
Lokasi Deformasi Maksimum	Area lubang pusat (<i>center hole</i>) yang menerima pembebanan langsung

Berdasarkan hasil simulasi, nilai deformasi maksimum yang terjadi masih berada dalam batas yang dapat diterima sehingga tidak memengaruhi fungsi *jig* selama proses *assembly*. Nilai deformasi yang relatif kecil menunjukkan bahwa struktur memiliki kekakuan yang cukup untuk menahan beban kerja yang diberikan oleh sistem pneumatik.

3.2. *Equivalent stress*

Analisis *equivalent stress* (*Von Mises stress*) dilakukan untuk mengevaluasi distribusi tegangan yang terjadi pada struktur *existing jig*. Tegangan *Von Mises* digunakan sebagai kriteria kegagalan material karena mampu merepresentasikan kondisi tegangan kompleks yang terjadi pada komponen mekanik [12], [17].



Gambar 2. Hasil *equivalent stress*

Berdasarkan Gambar 2. Hasil *Equivalent stress* menunjukkan bahwa regangan elastis maksimum yang terjadi pada *jig assembly* sebesar **$1,2089 \times 10^{-5}$ mm/mm** dan terletak pada area lubang pusat yang menerima pembebanan secara langsung. Distribusi regangan terkonsentrasi pada area kontak dan menurun secara bertahap menuju bagian luar komponen. Sebagian besar struktur menunjukkan nilai regangan yang sangat rendah, ditandai dengan dominasi warna biru pada hasil simulasi. Nilai regangan

maksimum yang hanya mencapai **0,0012%** menunjukkan bahwa material masih berada dalam daerah elastis sehingga tidak mengalami deformasi permanen selama proses pembebanan. Hasil ini mengindikasikan bahwa desain *jig* yang diusulkan memiliki kemampuan yang baik dalam menahan beban kerja operasional dan mampu mempertahankan integritas struktural selama proses *assembly* berlangsung.

Tabel 2 menunjukkan rekapitulasi hasil simulasi *equivalent stress* pada *existing jig assembly Base Stator*.

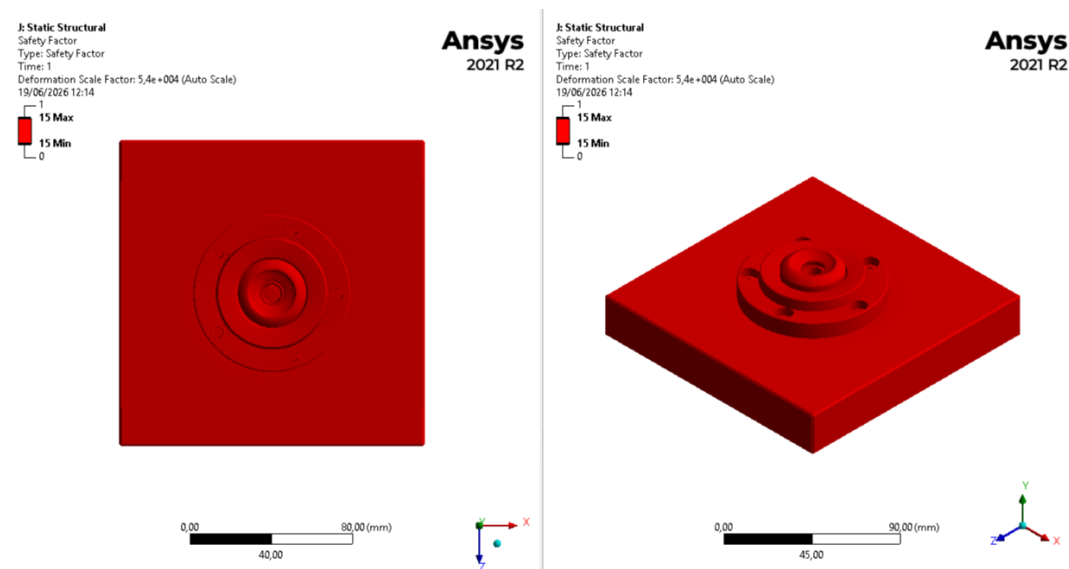
Tabel 2. Hasil simulasi *equivalent stress*

Parameter	Nilai
Tegangan Minimum	$3,5822 \times 10^{-5}$ MPa
Tegangan Maksimum	2,6175 MPa
<i>Yield strength</i> Material S45C	343 Mpa
Lokasi Tegangan Maksimum	Tepi dalam (inner edge) lubang pusat pada area kontak pembebanan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan maksimum terjadi pada area yang mengalami konsentrasi tegangan akibat perubahan geometri atau kontak pembebanan. Nilai *equivalent stress* maksimum yang diperoleh masih berada di bawah nilai *yield strength* material S45C sebesar 343 MPa sehingga struktur belum mengalami kondisi plastis dan masih aman digunakan dalam kondisi operasi normal.

3.3. *Safety factor*

Safety factor digunakan untuk menentukan tingkat keamanan struktur terhadap kemungkinan terjadinya kegagalan material. Nilai *safety factor* diperoleh berdasarkan perbandingan antara *yield strength* material dan *equivalent stress* maksimum hasil simulasi [11], [16].



Gambar 3. Nilai *safety factor*

Hasil simulasi *safety factor* ditunjukkan pada Gambar 3, bahwa seluruh bagian *jig assembly* memiliki nilai faktor keamanan minimum sebesar 15, yang merupakan batas maksimum tampilan pada ANSYS. Distribusi *safety factor* yang seragam pada seluruh struktur menunjukkan bahwa tidak terdapat area kritis yang berpotensi mengalami kegagalan akibat pembebanan operasional. Jika dibandingkan dengan hasil simulasi *equivalent stress* sebesar 2,6175 MPa dan *yield strength* material S45C sebesar

343 MPa, diperoleh faktor keamanan teoritis sebesar 131,04. Nilai tersebut jauh lebih besar dibandingkan faktor keamanan minimum yang umum digunakan pada desain komponen mekanik statis. Distribusi warna merah yang merata pada seluruh permukaan komponen menunjukkan bahwa seluruh bagian struktur memiliki faktor keamanan yang sangat tinggi terhadap beban yang diberikan. Tidak terdapat area dengan nilai safety factor rendah yang mengindikasikan potensi kegagalan material, sehingga struktur bekerja jauh di bawah batas luluh (yield strength) material yang digunakan. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa desain *jig* hasil modifikasi memiliki tingkat keamanan struktural yang sangat tinggi dan mampu menahan beban kerja selama proses *assembly seal Base Stator* tanpa risiko kegagalan material.

Tabel 3 menunjukkan rekapitulasi hasil simulasi *safety factor* pada *existing jig assembly Base Stator*.

Tabel 3. Hasil simulasi *safety factor*

Parameter	Nilai
<i>Equivalent stress</i> Maksimum	2,6175 MPa
<i>Yield strength</i> Material S45C	343 MPa
<i>Safety factor</i> Minimum	15
<i>Safety factor</i> Teoritis	131,04

Berdasarkan hasil simulasi, nilai *safety factor* minimum berada di atas batas aman desain yaitu $SF > 1$. Hal ini menunjukkan bahwa *existing jig assembly Base Stator* masih mampu menahan beban kerja yang diberikan tanpa mengalami kegagalan material. Semakin besar nilai *safety factor* yang diperoleh, semakin tinggi tingkat keamanan struktur terhadap beban operasional.

3.4. Perbandingan Hasil Simulasi dan Perhitungan Teoritis

Berdasarkan hasil analisis *total deformation*, *equivalent stress*, dan *safety factor*, *existing jig assembly Base Stator* menunjukkan performa struktur yang baik dalam menahan beban kerja proses *assembly*. Nilai tegangan maksimum masih berada di bawah batas luluh material S45C, sedangkan nilai deformasi yang terjadi tidak memengaruhi fungsi *jig* selama proses produksi. Selain itu, nilai *safety factor* yang memenuhi kriteria desain menunjukkan bahwa struktur masih aman digunakan dalam operasi produksi.

Hasil penelitian ini memberikan informasi mengenai kondisi aktual *existing jig* dan dapat digunakan sebagai data dasar (*baseline*) untuk pengembangan desain *jig* pada penelitian lanjutan, khususnya dalam upaya peningkatan kapasitas produksi dan implementasi sistem poka-yoke mekanis.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil Finite Element Analysis pada pembebanan statis sebesar 785 N, *existing jig assembly Base Stator* menunjukkan respons struktural yang aman. Deformasi maksimum sebesar 0,00020421 mm terjadi pada area lubang pusat dan menunjukkan bahwa struktur memiliki kekakuan yang memadai. Tegangan Von Mises maksimum sebesar 2,6175 MPa masih jauh di bawah tegangan luluh material S45C sebesar 343 MPa. Nilai safety factor minimum yang ditampilkan ANSYS adalah 15, sedangkan hasil perhitungan teoritis mencapai 131,04. Dengan demikian, *existing jig assembly Base Stator* mampu menahan beban operasional pada kondisi simulasi tanpa mengalami deformasi permanen maupun kegagalan material. Hasil ini dapat digunakan sebagai data dasar dalam pengembangan desain *jig*, terutama untuk peningkatan kapasitas produksi dan penerapan sistem poka-yoke mekanis.

5. Daftar Pustaka

- [1] Yunus, A., R. Yasra, and H. Irwan. 2020. Perancangan *jig* berdasarkan studi gerak dan waktu dalam mendukung penyelesaian failure analysis customer return di PT Excelitas Technologies Batam. Profisiensi. 4(1): 1-9.

- [2] Sundar, R., A. N. Balaji, and R. M. Satheesh Kumar. 2014. A review on lean manufacturing implementation techniques. *Procedia Eng.* 97: 1875-1885.
- [3] Groover, M. P. 2007. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. John Wiley & Sons, New York.
- [4] Logan, D. L. 2017. *A First Course in the Finite Element Method*. 6th ed. Cengage Learning, Boston.
- [5] Rao, S. S. 2018. *The Finite Element Method in Engineering*. 6th ed. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [6] Gere, J. M. and B. J. Goodno. 2018. *Mechanics of Materials*. 9th ed. Cengage Learning, Boston.
- [7] Dowling, N. E. 2019. *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*. 5th ed. Pearson, Boston.
- [8] Goldratt, E. M. 2014. *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*. 3rd rev. ed. North River Press, Great Barrington.
- [9] Festo Didactic. 2015. *Fundamentals of Pneumatics: Basic Level*. Festo Didactic, Esslingen.
- [10] Pneumax S.p.A. 2018. *Didactic Handbook: Modern Pneumatics*. Pneumax S.p.A., Milan.
- [11] Logan, D. L. 2017. *A First Course in the Finite Element Method*. 6th ed. Cengage Learning, Boston.
- [12] Rao, S. S. 2018. *The Finite Element Method in Engineering*. 6th ed. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [13] Gere, J. M. and B. J. Goodno. 2018. *Mechanics of Materials*. 9th ed. Cengage Learning, Boston.
- [14] Dowling, N. E. 2019. *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*. 5th ed. Pearson, Boston.
- [15] Hibbeler, R. C. 2017. *Mechanics of Materials*. 10th ed. Pearson, Hoboken.
- [16] SimScale. Von Mises stress and yield criterion. Available at: <https://www.simscale.com/blog/von-mises-stress/>. Accessed 3 August 2026.
- [17] Ansys Inc. Ansys Mechanical: Structural FEA analysis software. Available at: <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical>. Accessed 3 August 2026.