

ANALISIS STRUKTURAL IMPELLER POMPA BOOSTER PADA SISTEM PERPIPAAN DENGAN VARIASI JUMLAH SUDU MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

*Muhammad Tsany Lesmana¹, Ismoyo Haryanto², Gunawan Dwi Haryadi²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, S.H., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: tsanylesmana24@gmail.com

Abstrak

Pompa booster memiliki peranan penting dalam sistem perpipaan untuk menjaga kestabilan tekanan fluida pada jalur distribusi jarak jauh. Salah satu komponen utama yang menentukan keandalan pompa sentrifugal adalah impeller, yang bekerja di bawah pengaruh gaya sentrifugal dan tekanan fluida. Perbedaan desain impeller, khususnya jumlah sudu, dapat memengaruhi respons struktural dan risiko kegagalan mekanik.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi jumlah sudu impeller, yaitu 6 dan 8 sudu, terhadap distribusi tegangan Von Mises, deformasi total, regangan elastis ekuivalen, dan faktor keamanan pada pompa booster dalam sistem perpipaan. Analisis dilakukan menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) dengan bantuan perangkat lunak ANSYS. Model geometri impeller dibuat menggunakan SolidWorks dengan kecepatan rotasi 5000 RPM dan tekanan operasi sesuai spesifikasi pompa booster. Material impeller yang digunakan adalah duplex stainless steel.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa impeller dengan 8 sudu menghasilkan deformasi total yang lebih rendah sebesar $9,10 \times 10^{-5}$ mm dibandingkan impeller 6 sudu sebesar $9,33 \times 10^{-5}$ mm. Namun, nilai tegangan Von Mises dan regangan elastis ekuivalen pada impeller 8 sudu sedikit lebih tinggi. Faktor keamanan minimum pada kedua konfigurasi mencapai nilai 15, yang menunjukkan bahwa kedua desain aman secara struktural. Berdasarkan hasil analisis, impeller dengan 8 sudu menunjukkan performa struktural yang sedikit lebih baik dan direkomendasikan untuk aplikasi pompa booster dalam sistem perpipaan.

Kata Kunci: analisis structural; impeller; jumlah sudu; metode elemen hingga; pompa booster

Abstract

Booster pumps play an important role in piping systems to maintain fluid pressure stability in long-distance distribution lines. One of the main components that determines the reliability of centrifugal pumps is the impeller, which works under the influence of centrifugal force and fluid pressure. Differences in impeller design, particularly the number of blades, can affect structural response and the risk of mechanical failure.

This study aims to analyze the effect of impeller blade number variations, namely 6 and 8 blades, on Von Mises stress distribution, total deformation, equivalent elastic strain, and safety factor in booster pumps in piping systems. The analysis was performed using the finite element method (FEM) with the assistance of ANSYS software. The impeller geometry model was created using SolidWorks with a rotation speed of 5000 RPM and operating pressure according to the booster pump specifications. The impeller material used was duplex stainless steel.

The simulation results showed that the 8-blade impeller produced a lower total deformation of 9.10×10^{-5} mm compared to the 6-blade impeller of 9.33×10^{-5} mm. However, the Von Mises stress and equivalent elastic strain values for the 8-blade impeller are slightly higher. The minimum safety factor for both configurations reaches a value of 15, indicating that both designs are structurally safe. Based on the analysis results, the 8-blade impeller shows slightly better structural performance and is recommended for booster pump applications in piping systems.

Keywords: booster pump; finite element method; impeller; number of blades; structural analysis

1. Pendahuluan

Sistem perpipaan memiliki peran strategis dalam distribusi fluida, khususnya pada sektor industri energi dan bahan bakar minyak.[1] Pada sistem distribusi jarak jauh, penurunan tekanan akibat gesekan dan elevasi menjadi permasalahan utama yang dapat mengganggu kontinuitas aliran [2]. Oleh karena itu, pompa booster digunakan untuk meningkatkan dan mempertahankan tekanan fluida agar aliran tetap stabil dan sesuai dengan kebutuhan operasional.[3]

Pompa sentrifugal merupakan jenis pompa yang umum digunakan sebagai pompa booster, dengan impeller sebagai komponen utama yang mentransfer energi mekanik menjadi energi kinetik dan tekanan fluida.[4] Selama beroperasi, impeller mengalami berbagai beban mekanik seperti gaya sentrifugal, tekanan hidrolik, dan getaran. Beban-beban tersebut dapat menyebabkan deformasi elastis, konsentrasi tegangan, hingga kegagalan struktural apabila desain impeller tidak sesuai.[5].

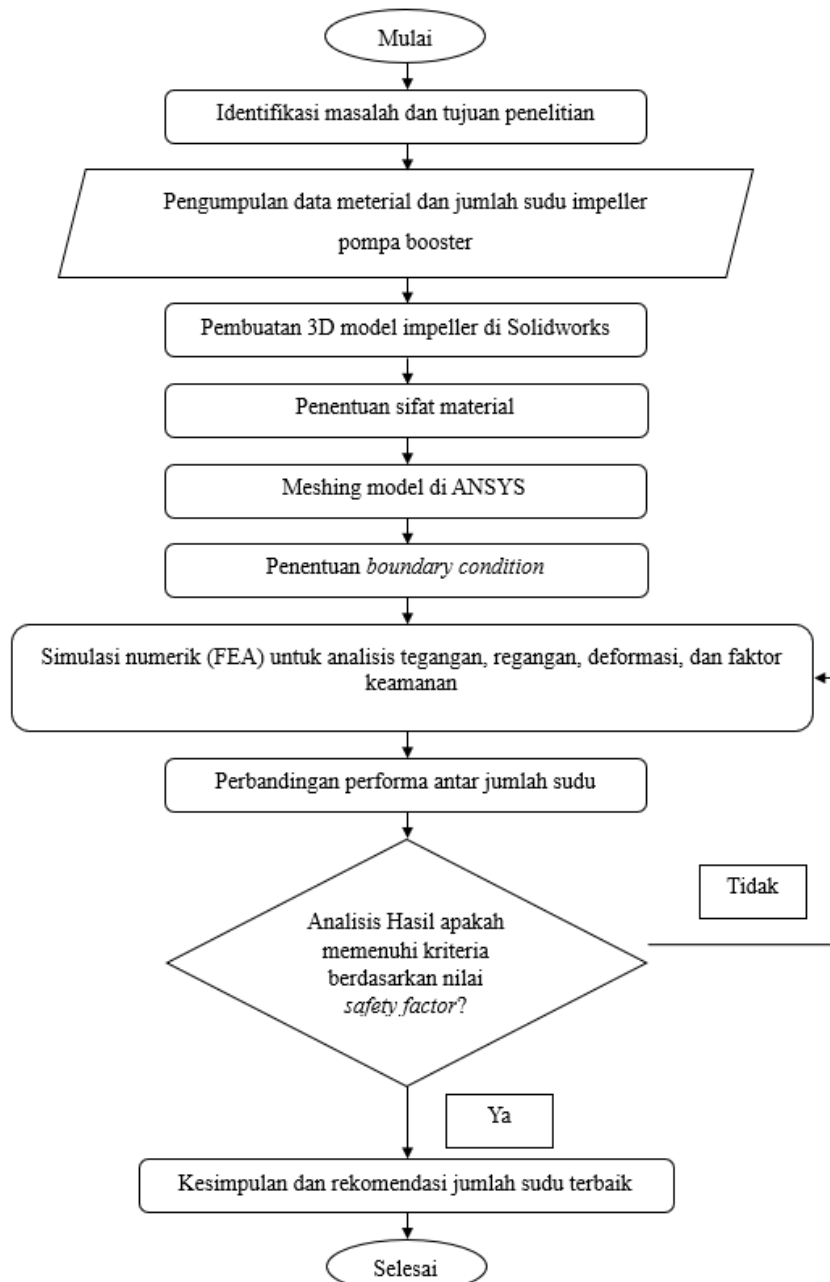
Salah satu parameter desain penting pada impeller adalah jumlah sudu. Variasi jumlah sudu dapat memengaruhi distribusi aliran fluida, efisiensi pompa, serta respons struktural impeller.[6] Impeller dengan jumlah sudu lebih banyak cenderung menghasilkan aliran yang lebih stabil, namun juga meningkatkan beban struktural akibat distribusi gaya yang berbeda.[7] Oleh karena itu, diperlukan kajian numerik untuk mengevaluasi pengaruh jumlah sudu terhadap keandalan struktural impeller [8].

Metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) merupakan pendekatan numerik yang efektif untuk menganalisis respons struktural komponen kompleks tanpa memerlukan pengujian fisik yang mahal dan memakan waktu.[9] Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan respons struktural impeller pompa booster dengan variasi jumlah sudu 6 dan 8 menggunakan metode elemen hingga, sehingga dapat diperoleh konfigurasi impeller yang paling andal secara struktural [10].

2. Bahan dan Metode Penelitian

2.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode simulasi numerik berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) untuk menganalisis pengaruh variasi jumlah sudu impeller pompa booster terhadap karakteristik mekanik dan nilai *safety factor*. Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis sebagaimana ditunjukkan pada Gambar berikut.

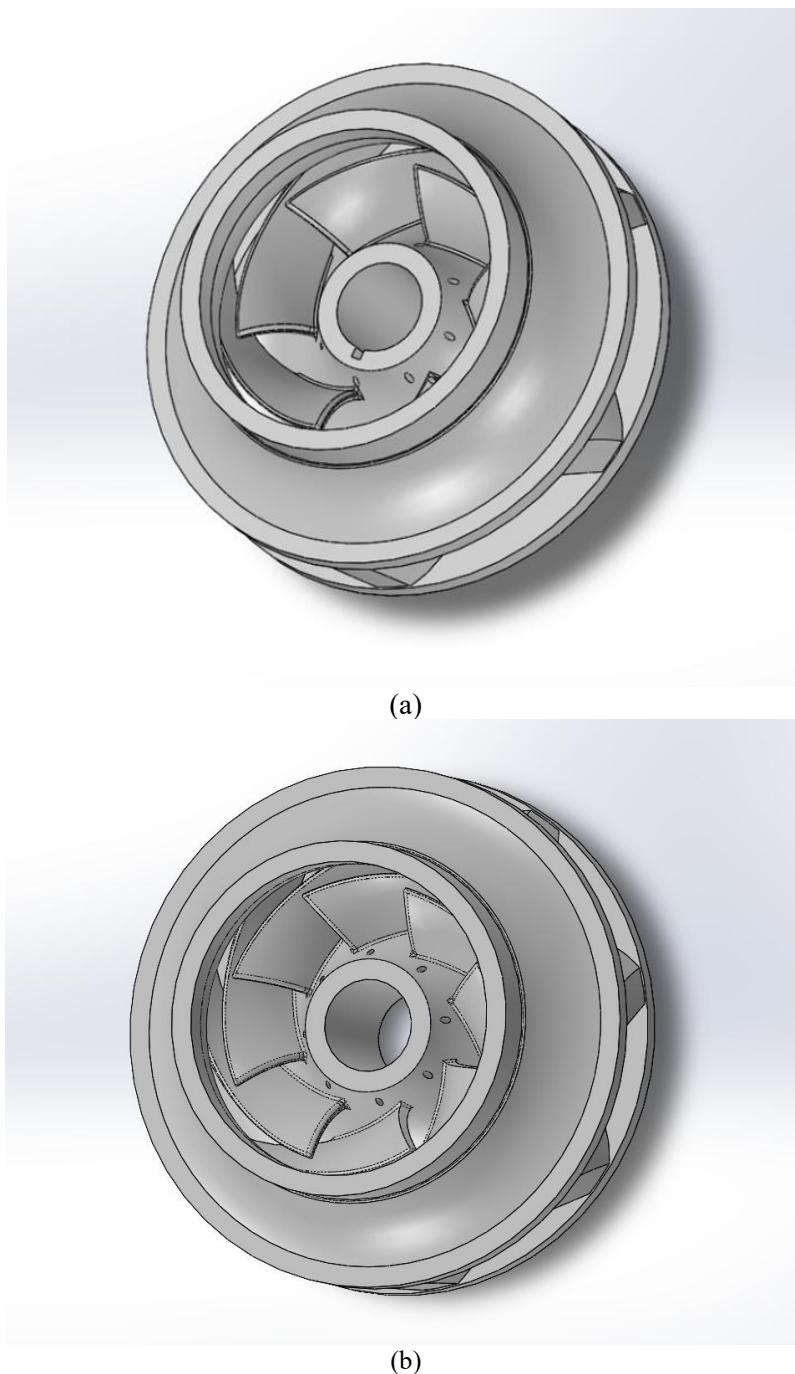


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan alur pada Gambar tersebut, penelitian diawali dengan identifikasi masalah dan pengumpulan data material serta variasi jumlah sudu impeller. Selanjutnya dilakukan pemodelan 3D menggunakan SolidWorks, penentuan sifat material, serta proses *meshing* dan *boundary condition* di ANSYS. Simulasi FEA dilakukan untuk memperoleh nilai tegangan, regangan, deformasi, dan *safety factor*. Hasil simulasi dibandingkan untuk menentukan variasi jumlah sudu yang memenuhi kriteria keamanan dan menghasilkan rekomendasi desain impeller terbaik.

2.2 Model Geometri Impeller

Model geometri impeller dibuat menggunakan perangkat lunak SolidWorks. Impeller yang dianalisis merupakan jenis *closed impeller* dengan dua variasi jumlah sudu, yaitu 6 sudu dan 8 sudu. Dimensi geometri kedua model dibuat identik, kecuali pada jumlah sudunya, untuk memastikan bahwa perbedaan hasil analisis hanya dipengaruhi oleh variasi jumlah sudu.



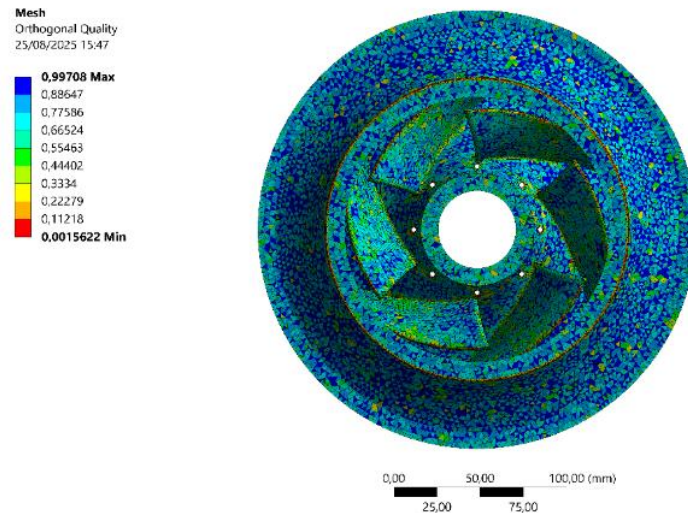
Gambar 2. Model geometri impeller pompa booster: (a) Impeller 6 sudu, (b) Impeller 8 sudu

2.3 Material Impeller

Material impeller yang digunakan adalah duplex stainless steel, yang memiliki kombinasi kekuatan mekanik tinggi dan ketahanan korosi yang baik. Sifat mekanik material dimasukkan ke dalam perangkat lunak ANSYS, meliputi modulus elastisitas, rasio Poisson, dan batas luluh material.

2.4 Metode Elemen Hingga

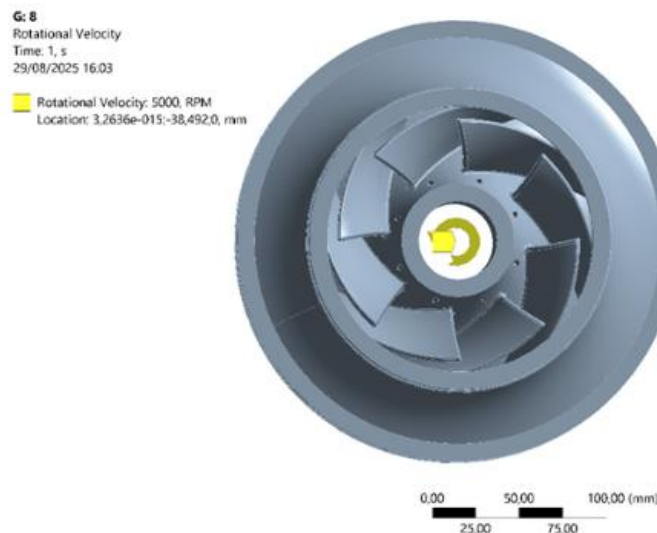
Analisis struktural dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS dengan jenis analisis *static structural*. Model impeller didiskritisasi menggunakan elemen padat (*solid elements*). Uji independensi grid dilakukan untuk memastikan hasil simulasi tidak dipengaruhi oleh ukuran mesh.



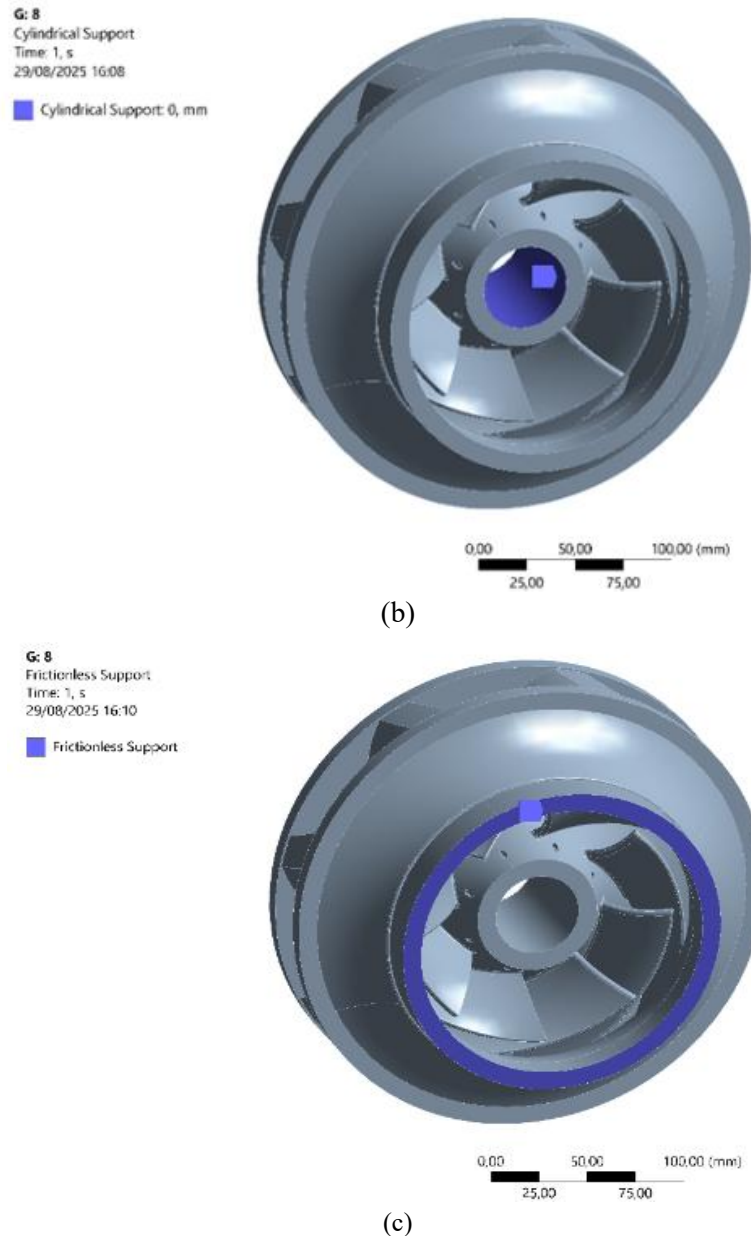
Gambar 3. Hasil meshing model impeller sebelum dilakukan analisis struktural.

2.5 Boundary Condition dan Beban

Boundary condition yang diterapkan meliputi kecepatan rotasi impeller sebesar 5000 RPM, tekanan fluida sesuai kondisi operasi pompa booster, serta penumpuan berupa *cylindrical support* dan *frictionless support* pada bagian tertentu dari impeller. Beban yang dianalisis mencakup gaya sentrifugal akibat rotasi dan tekanan statis fluida.



(a)



Gambar 4. Boundary condition dan pembebanan pada impeller pompa booster (a)rotational velocity, (b) cylindrical support, (c)frictionless support

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Grid independence test

Tabel 3.1 menyajikan hasil grid independence test pada analisis total deformation impeller pompa booster berbahan Duplex SS 2055 dengan konfigurasi 6 sudu. Pengujian dilakukan dengan variasi ukuran elemen untuk mengevaluasi pengaruh kerapatan mesh terhadap hasil simulasi numerik.

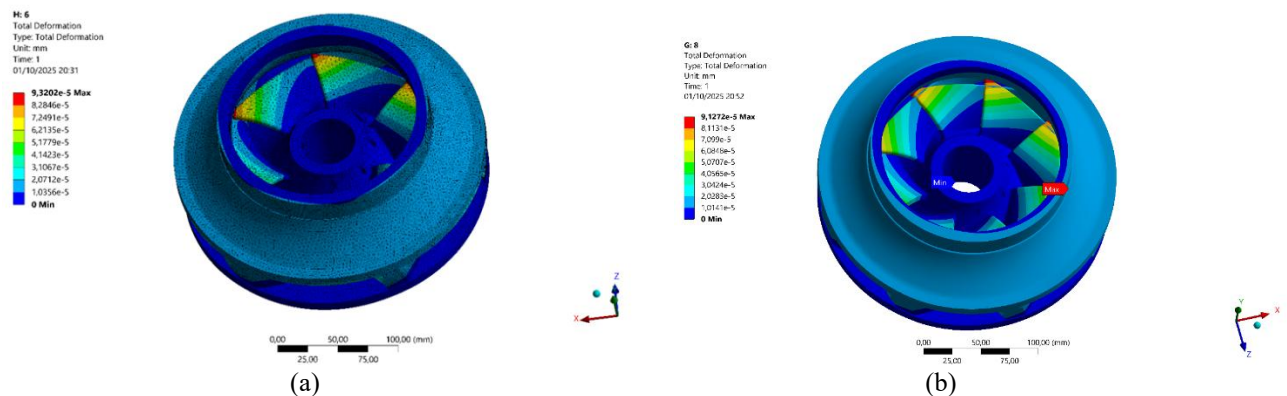
Tabel 1. Grid independence pada Total Deformation Material Duplex SS 2055 Blade 6

No	Size (mm)	Element	Nodes	Deformation (mm)	Error (%)
1.	4	459351	657821	0,090840	-
2.	3	736433	1078275	0,091827	1,08
3.	2	1087624	1726971	0,091871	0,04
4.	1	1359785	2953218	0,091892	0,017
5.	0,5	1759972	5897963	0.091905	0,0085

Berdasarkan hasil pada Tabel 4.1, nilai total deformation menunjukkan kecenderungan konvergen seiring dengan pengecilan ukuran elemen mesh. Selisih hasil deformasi antar variasi mesh semakin kecil, yang mengindikasikan bahwa pengaruh ukuran elemen terhadap hasil simulasi menjadi tidak signifikan. Pada ukuran elemen 3 mm, nilai error terhadap mesh yang lebih halus hanya sebesar 1,08%, serta nilai deformasi telah mendekati hasil pada ukuran elemen yang lebih kecil. Oleh karena itu, ukuran elemen 3 mm dipilih sebagai mesh optimal karena mampu memberikan hasil yang stabil dengan waktu komputasi yang efisien, dan selanjutnya digunakan dalam seluruh analisis simulasi.

3.2 Deformasi Total

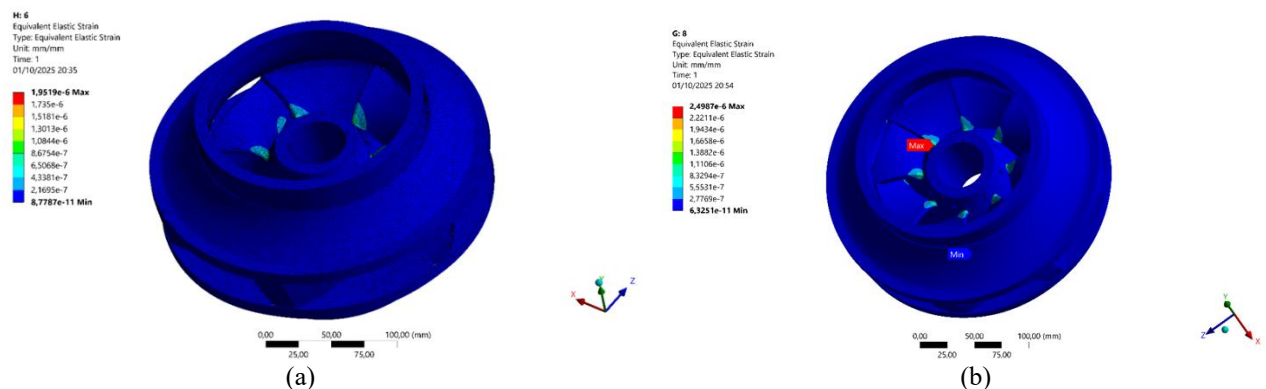
Hasil simulasi menunjukkan bahwa deformasi maksimum terjadi pada ujung sudu impeller. Impeller dengan 6 sudu mengalami deformasi total maksimum sebesar $9,33 \times 10^{-5}$ mm, sedangkan impeller dengan 8 sudu mengalami deformasi maksimum sebesar $9,10 \times 10^{-5}$ mm. Nilai deformasi yang lebih kecil pada impeller 8 sudu menunjukkan distribusi beban yang lebih merata.



Gambar 5. Distribusi deformasi total pada impeller: (a) 6 sudu, (b) 8 sudu

3.3 Regangan Elastis Ekuivalen

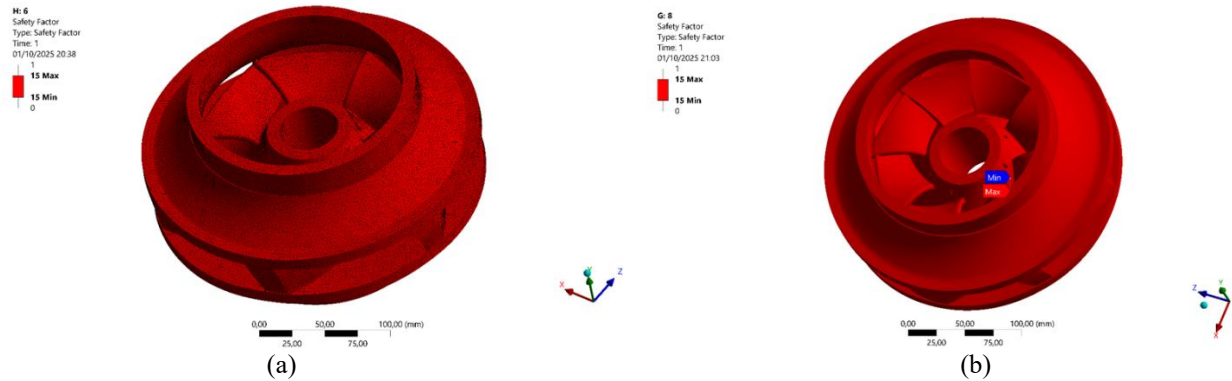
Nilai regangan elastis ekuivalen maksimum pada impeller 6 sudu sebesar $1,95 \times 10^{-6}$, sedangkan pada impeller 8 sudu sebesar $2,50 \times 10^{-6}$. Peningkatan regangan pada impeller 8 sudu sejalan dengan peningkatan tegangan yang terjadi akibat distribusi beban struktural.



Gambar 6. Distribusi Regangan Elastis Equivalent pada impeller: (a) 6 sudu, (b) 8 sudu

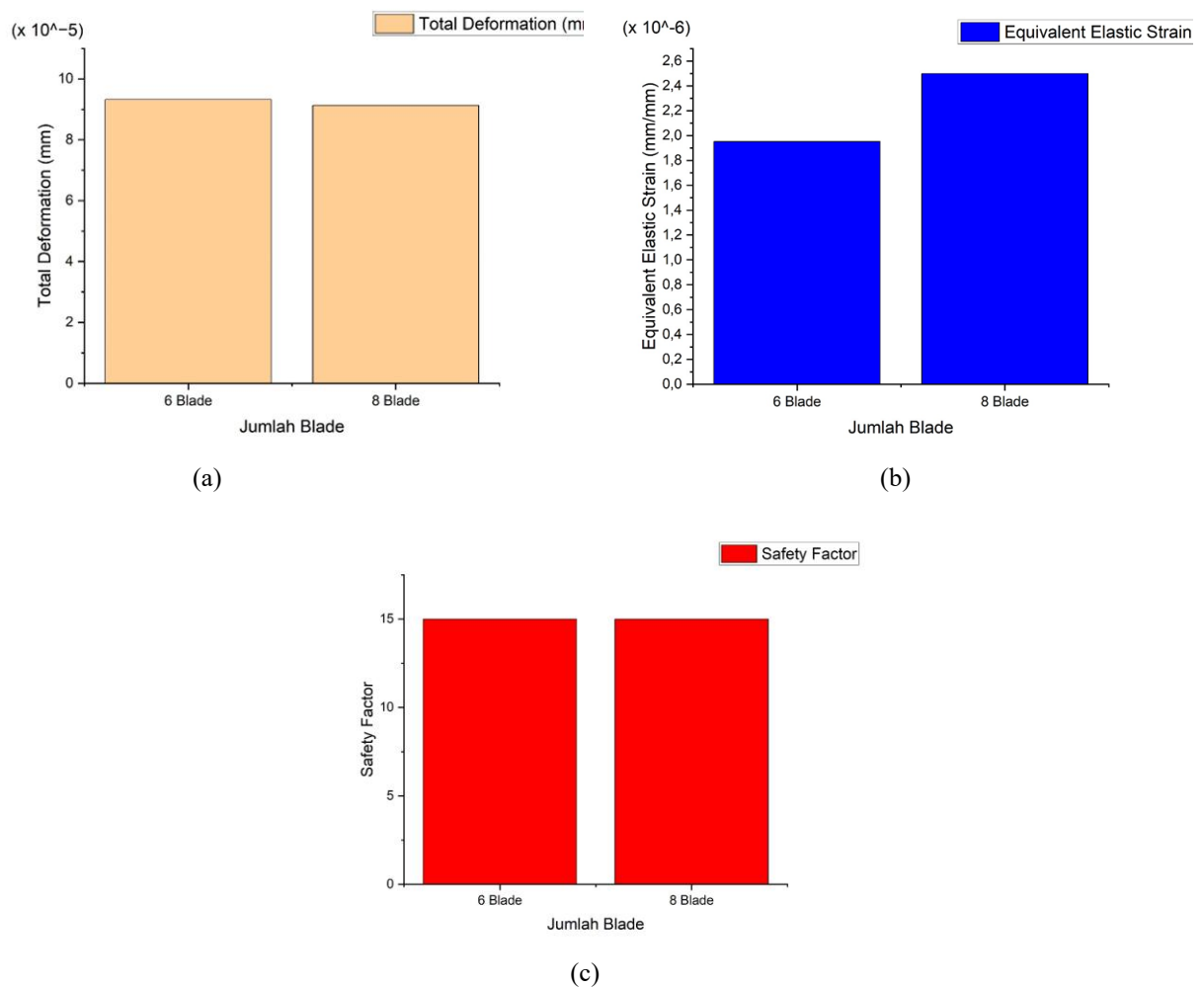
3.4 Faktor Keamanan

Analisis faktor keamanan menunjukkan bahwa kedua variasi impeller memiliki faktor keamanan minimum sebesar 15. Nilai ini menunjukkan bahwa kedua desain impeller berada dalam kondisi aman untuk operasi pompa booster dan memiliki margin keamanan yang cukup besar.



Gambar 7. Distribusi faktor keamanan pada impeller: (a) 6 sudu, (b) 8 sudu

Gambar berikut menunjukkan perbandingan hasil simulasi numerik antara impeller dengan 6 dan 8 sudu, meliputi *total deformation*, *equivalent elastic strain*, dan *safety factor* berdasarkan analisis *Finite Element Analysis* (FEA).



Gambar 8. Perbandingan hasil analisis struktural impeller 6 dan 8 sudu: (a)*Total Deformation*, (b)*Equivalent Elastic Strain*, (c)*Safety Factor*

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis struktural impeller pompa booster menggunakan metode elemen hingga, diperoleh beberapa temuan utama yang menunjukkan pengaruh variasi jumlah sudu terhadap respons struktural impeller. Adapun kesimpulan penelitian ini dapat dirangkum sebagai berikut:

1. Variasi jumlah sudu berpengaruh terhadap respons struktural impeller pompa booster, terutama pada nilai deformasi, tegangan, dan regangan yang terjadi selama kondisi operasi.
2. Impeller dengan 8 sudu menghasilkan deformasi total maksimum yang lebih rendah dibandingkan impeller dengan 6 sudu, yang menunjukkan distribusi beban struktural yang lebih merata.
3. Nilai tegangan Von Mises dan regangan elastis ekuivalen pada impeller 8 sudu sedikit lebih tinggi dibandingkan impeller 6 sudu, namun seluruh nilai tegangan yang terjadi masih berada jauh di bawah batas luluh material.
4. Faktor keamanan minimum pada kedua variasi impeller mencapai nilai 15, sehingga kedua desain dinyatakan aman secara struktural untuk diaplikasikan pada sistem perpipaan.
5. Metode elemen hingga (Finite Element Method) terbukti efektif dan andal sebagai alat prediktif dalam mengevaluasi desain struktural impeller pompa booster sebelum tahap manufaktur.

5. Daftar Pustaka

- [1] J. R. Saithala and A. Kharusi, "Failure analysis of super duplex stainless steel pump casing," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 179, no. May, p. 109764, 2025, doi: 10.1016/j.engfailanal.2025.109764.
- [2] A. Achabbak, M. S. Mohamed, M. Seaid, and N. Yebari, "A fractional partition of unity finite element method for transient anomalous diffusion problems," *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 474, p. 116992, 2026, doi: 10.1016/j.cam.2025.116992.
- [3] S. Li, Z. Wang, W. Ding, Q. Zhang, and L. Gu, "Experimental study on mechanical properties of a new duplex stainless steel for structures under different temperature-stress combination paths," *Eng. Struct.*, vol. 343, no. PC, p. 121167, 2025, doi: 10.1016/j.engstruct.2025.121167.
- [4] M. W. Huang *et al.*, "On concave polygon mesh for axisymmetric problems of solids using cell-based smoothed finite element method," *Eng. Anal. Bound. Elem.*, vol. 179, no. August, 2025, doi: 10.1016/j.enganabound.2025.106416.
- [5] H. A. Warda, I. G. Adam, A. B. Rashad, and M. W. Gamal-Aldin, "Bi-directional integral pumping devices for dual mechanical seals: Influence of mesh type on accuracy of numerical simulations," *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, no. 4, pp. 3255–3264, 2018, doi: 10.1016/j.aej.2017.11.013.
- [6] B. Ni, Z. Chen, W. Tian, and C. Jiang, "A Neumann expansion-based sequential simulation method for structural interval finite element analysis," *Comput. Struct.*, vol. 316, no. December 2024, p. 107892, 2025, doi: 10.1016/j.compstruc.2025.107892.
- [7] A. Rivas, G. K. Delipei, I. Davis, S. Bhongale, J. Yang, and J. Hou, "A component diagnostic and prognostic framework for pump bearings based on deep learning with data augmentation," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 247, no. April, p. 110121, 2024, doi: 10.1016/j.ress.2024.110121.
- [8] A. E. Kristiyono and M. R. Gunarti, "Terhadap Kapasitas Dan Efisiensi Pompa Sentrifugal," *Samudra Politek. Pelayaran Surabaya*, vol. 3, no. 1, pp. 26–34, 2018.
- [9] M. F. H. Hasanain and M. Mahachandra, "Analisis dan Upaya Penurunan Losses pada Produk Solar pada Distribusi BBM di TBBM Tanjung Priok PT Pertamina," *Ind. Eng. Online J.*, vol. 14, no. 1, pp. 58–70, 2025.
- [10] J. Xu *et al.*, "Analysis of pressure pulsation and its correlation to energy dissipation in centrifugal pump with bionic optimal impeller base on proper orthogonal decomposition," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 64, no. April, p. 103822, 2025, doi: 10.1016/j.tsep.2025.103822.