

ANALISIS STRUKTURAL MATERIAL *IMPELLER* POMPA *BOOSTER* PADA SISTEM PERPIPAAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

*Felix Tusta Pradhana¹, 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: felixpradhana04@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi respons struktural *impeller* pompa booster yang beroperasi pada sistem perpipaan industri dengan menggunakan Metode Elemen Hingga. Analisis dilakukan untuk mengetahui distribusi tegangan, besarnya deformasi, serta faktor keamanan *impeller* terhadap beban operasi aktual. Model tiga dimensi *impeller* dibangun berdasarkan data geometris riil dan dianalisis menggunakan material *Stainless steel* AISI 304 yang memiliki modulus elastisitas 193 GPa, tegangan luluh 215 MPa, dan densitas 7.900 kg/m³. Kondisi pembebanan meliputi tekanan fluida sebesar 0,8 MPa dan kecepatan putar 2.900 rpm, yang merepresentasikan kondisi operasi standar pompa booster. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan *Von Mises* maksimum sebesar 148 MPa terjadi pada area transisi hub-blade, yaitu bagian yang menerima pengaruh terbesar dari beban sentrifugal dan tekanan fluida. Tegangan minimum tercatat sebesar 12 MPa pada area leading edge. Deformasi total mencapai 0,21 mm dan masih berada di bawah batas toleransi desain sebesar 0,5 mm, sehingga tidak menimbulkan risiko gangguan celah *impeller* maupun penurunan kinerja hidraulik pompa. Faktor keamanan sebesar 1,45 menunjukkan bahwa struktur *impeller* berada dalam kondisi aman dan tidak berpotensi mengalami kegagalan plastis pada kondisi operasi saat ini. Secara keseluruhan, Metode Elemen Hingga terbukti efektif dalam memprediksi karakteristik struktural *impeller* dan memberikan dasar yang kuat untuk evaluasi desain serta peningkatan keandalan pompa booster dalam sistem perpipaan industri.

Kata Kunci: *deformation; finite element method; impeller; safety factor; von mises stress*

Abstract

This research aims to evaluate the structural response of a booster pump *impeller* operating in an industrial pipeline system using the Finite Element Method. The analysis was conducted to determine the stress distribution, total deformation, and safety factor of the *impeller* under actual operating loads. A three-dimensional *impeller* model was developed based on real geometric data and analyzed using *Stainless steel* AISI 304, which has an elastic modulus of 193 GPa, a yield strength of 215 MPa, and a density of 7,900 kg/m³. The applied load conditions include a fluid pressure of 0.8 MPa and a rotational speed of 2,900 rpm, representing standard operating conditions of the booster pump. The simulation results show that the maximum *Von Mises* stress of 148 MPa occurs in the hub-blade transition region, which experiences the combined effects of centrifugal forces and fluid pressure. The minimum stress recorded was 12 MPa at the leading edge. Total deformation reached 0.21 mm, which remains below the design tolerance limit of 0.5 mm, ensuring that *impeller* clearance and pump hydraulic performance are not compromised. A safety factor of 1.45 indicates that the *impeller* maintains structural stability without risk of plastic failure under current operational conditions. Overall, the Finite Element Method is proven effective for predicting *impeller* structural behavior and serves as a reliable basis for design evaluation and enhancement of booster pump reliability in industrial pipeline systems.

Keywords: *deformation; finite element method; impeller; safety factor; von mises stress*

1. Pendahuluan

Distribusi bahan bakar minyak (BBM) melalui sistem perpipaan memegang peranan penting dalam menjaga ketahanan energi nasional karena mampu menjamin efisiensi, keselamatan, dan kontinuitas pasokan. Dalam sistem ini, pompa booster berfungsi meningkatkan dan menjaga tekanan fluida agar aliran BBM tetap stabil sepanjang jalur distribusi. Keandalan pompa booster menjadi faktor krusial karena kegagalan komponen utama dapat mengganggu operasi distribusi dan meningkatkan biaya pemeliharaan [1].

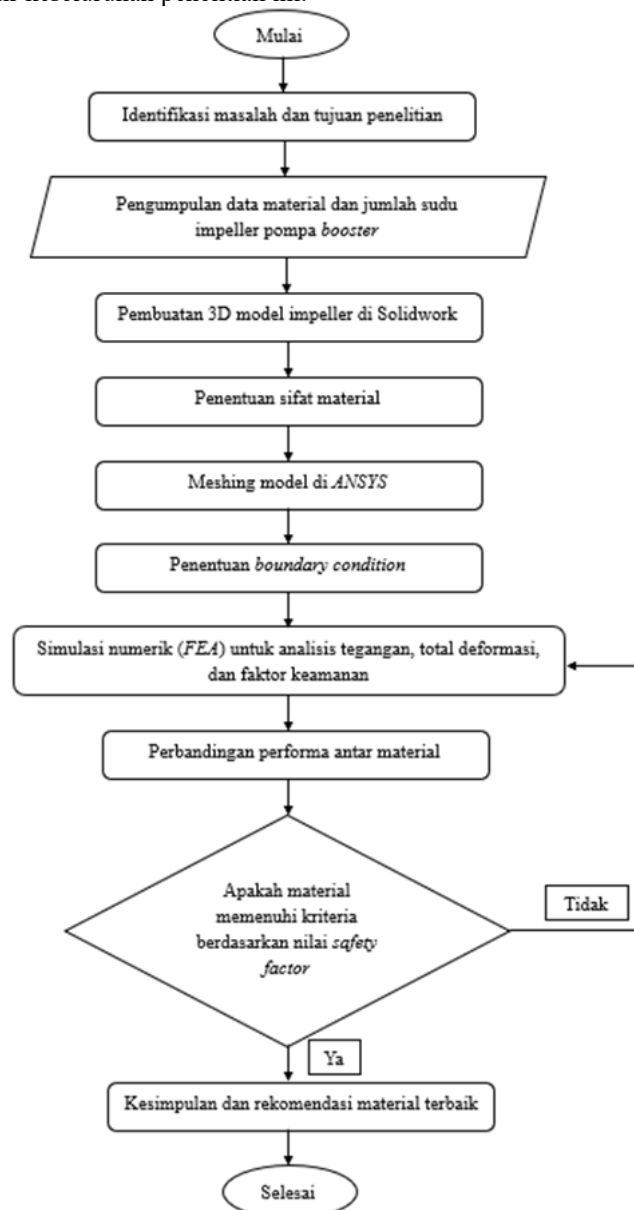
Impeller merupakan komponen utama pompa booster yang bekerja di bawah kombinasi beban rotasi, tekanan fluida, dan gaya sentrifugal, sehingga keandalan strukturalnya sangat dipengaruhi oleh material yang digunakan. Pemilihan material yang tidak tepat dapat menyebabkan tegangan berlebih, deformasi, dan kegagalan struktural dini. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) untuk menganalisis dan membandingkan respons struktural *impeller* pompa booster menggunakan empat jenis material, guna menentukan material yang paling optimal untuk aplikasi sistem perpipaan distribusi BBM [2].

Impeller merupakan komponen utama dalam pompa sentrifugal yang berfungsi mengubah energi mekanik dari motor penggerak menjadi energi kinetik dan tekanan fluida melalui gaya sentrifugal akibat putaran berkecepatan tinggi. Pada sistem pompa booster, *impeller* beroperasi secara kontinu pada kondisi tekanan dan kecepatan rotasi yang relatif tinggi, sehingga bekerja di bawah beban mekanik yang signifikan [3]. *Impeller* untuk aplikasi industri, termasuk distribusi BBM, umumnya dibuat dari material tahan korosi dan keausan seperti *stainless steel*, *aluminium bronze*, dan *duplex stainless-steel* yang dipilih berdasarkan karakteristik fluida, tekanan operasional, suhu kerja, serta kecepatan putaran. Pemilihan material yang kurang tepat dapat menyebabkan terjadinya tegangan berlebih, deformasi, dan kegagalan struktural akibat beban siklik dan kelelahan material selama operasi jangka panjang [4].

2. Bahan dan Metode Penelitian

2.1 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode simulasi numerik *Finite Element Analysis (FEA)* untuk menganalisis kekuatan struktural *impeller* pompa booster berdasarkan variasi material. Tahapan penelitian meliputi pembuatan model 3D *impeller*, penentuan sifat material, proses meshing, penetapan *boundary condition*, serta simulasi numerik untuk memperoleh nilai tegangan, deformasi total, dan faktor keamanan [5]. Hasil simulasi kemudian dibandingkan untuk menentukan material yang memenuhi kriteria keselamatan dan direkomendasikan sebagai material terbaik. Berikut adalah diagram alir keseluruhan penelitian ini.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.2 Pembuatan Geometri

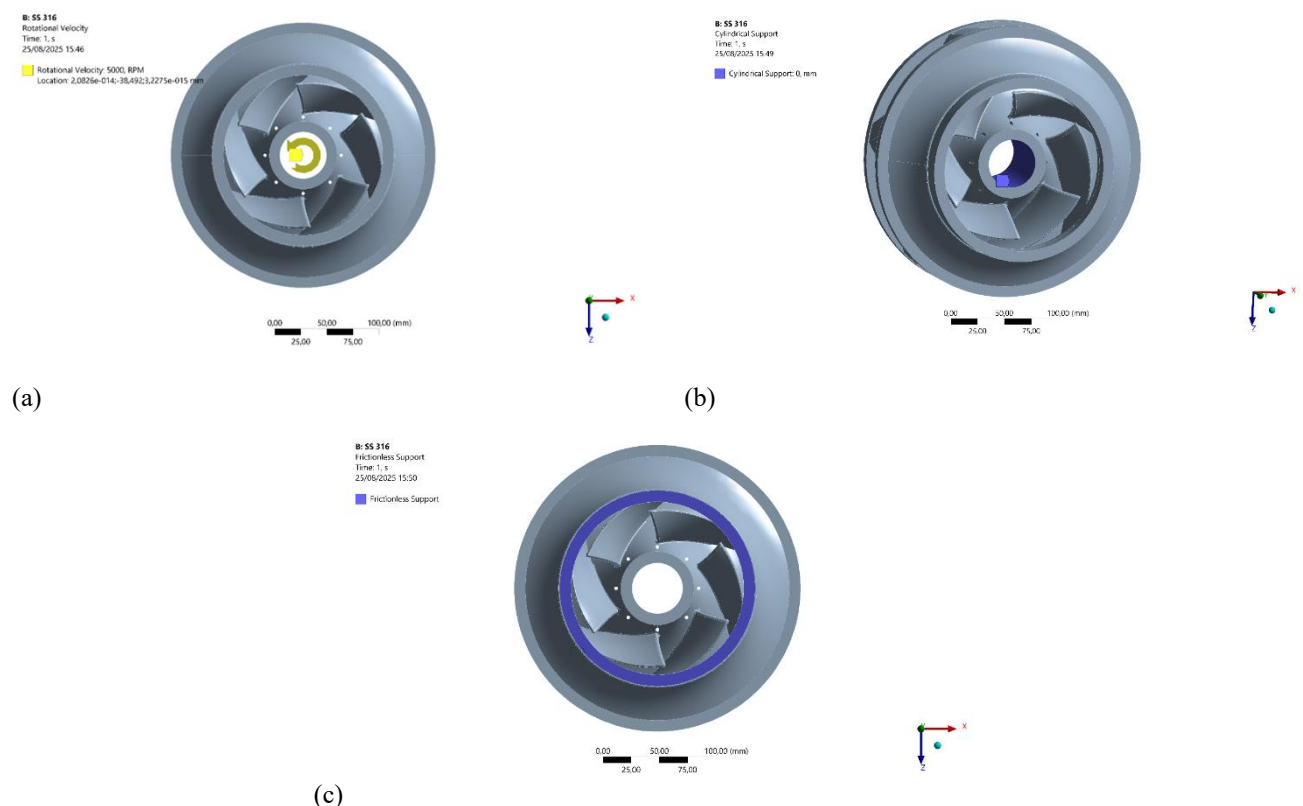
Tahap awal dalam analisis metode elemen hingga adalah pembuatan geometri komponen yang akan dianalisis. Pada penelitian ini, geometri *impeller* pompa booster dibuat menggunakan perangkat lunak CAD SolidWorks dengan dimensi yang disesuaikan dengan kondisi aktual agar hasil simulasi dapat merepresentasikan kondisi operasi yang sebenarnya. Perancangan geometri *impeller* dilakukan dengan memperhatikan parameter utama seperti diameter *impeller* jumlah dan sudut sudu, serta bentuk hub dan shroud. Selain itu, kesesuaian antar bagian geometri diperhatikan untuk menghindari ketidakraturan bentuk yang dapat memengaruhi hasil simulasi [6]. Model geometri yang telah dibuat kemudian diverifikasi secara visual sebelum digunakan sebagai dasar pada tahapan analisis numerik selanjutnya.



Gambar 2. Geometri *impeller* hasil pemodelan

2.3 Penentuan *Boundary Condition*

Pada tahap pemrosesan simulasi, penentuan *boundary condition* merupakan langkah krusial dalam analisis struktural berbasis metode elemen hingga (*FEA*) karena berfungsi merepresentasikan kondisi operasi nyata *impeller* pompa booster. Kondisi batas yang diterapkan meliputi kecepatan rotasi (*rotational velocity*), tumpuan poros (*cylindrical support*), serta pembatasan perpindahan tanpa gesekan (*frictionless support*). Penerapan kondisi batas ini bertujuan untuk memastikan interaksi model dengan lingkungan kerjanya dapat dimodelkan secara realistis sehingga hasil simulasi tegangan dan deformasi menjadi lebih akurat [7]. Visualisasi pengaturan kondisi batas ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 3. Visualisasi *Rotational Velocity* (a), Penerapan *Cylindrical support* (b) dan Penerapan *Frictionless Support*

Berdasarkan penerapan kondisi batas tersebut, *impeller* disimulasikan berputar dengan kecepatan 5000 RPM sesuai kondisi operasi aktual pompa booster. Kecepatan rotasi ini menghasilkan gaya sentrifugal dan gaya inersia yang bekerja pada seluruh bagian *impeller*, sementara *cylindrical support* berfungsi menahan pergerakan translasi pada area hub yang terhubung dengan poros. Selain itu, *frictionless support* diterapkan untuk membatasi perpindahan normal tanpa menimbulkan gaya gesek, sehingga menyerupai kondisi *impeller* di dalam casing pompa. Kombinasi kondisi batas ini memungkinkan analisis distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan dilakukan secara representatif terhadap kondisi kerja nyata *impeller* [8].

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Grid Independence Test

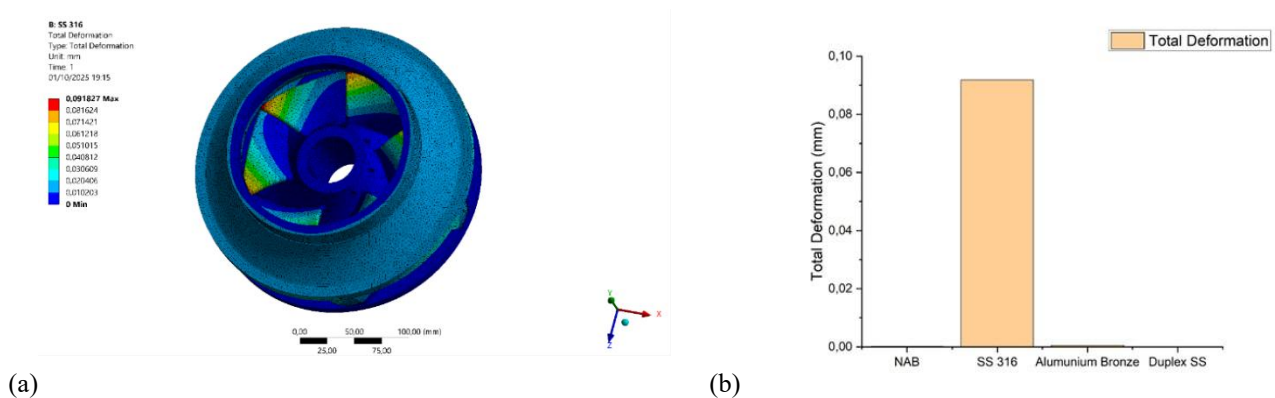
Untuk menjamin independensi hasil simulasi terhadap kerapatan mesh, dilakukan uji *grid independence* pada analisis struktural berbasis metode elemen hingga. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan ukuran mesh yang menghasilkan nilai deformasi konvergen dengan tetap mempertimbangkan efisiensi komputasi.

No	Size (mm)	Element	Nodes	Deformation (mm)	Error (%)
1.	4	459351	657821	0,090840	-
2.	3	738701	1081513	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

Gambar 4. Grid Independence Test

3.2 Analisis Equivalent elastic strain Terhadap Variasi Material

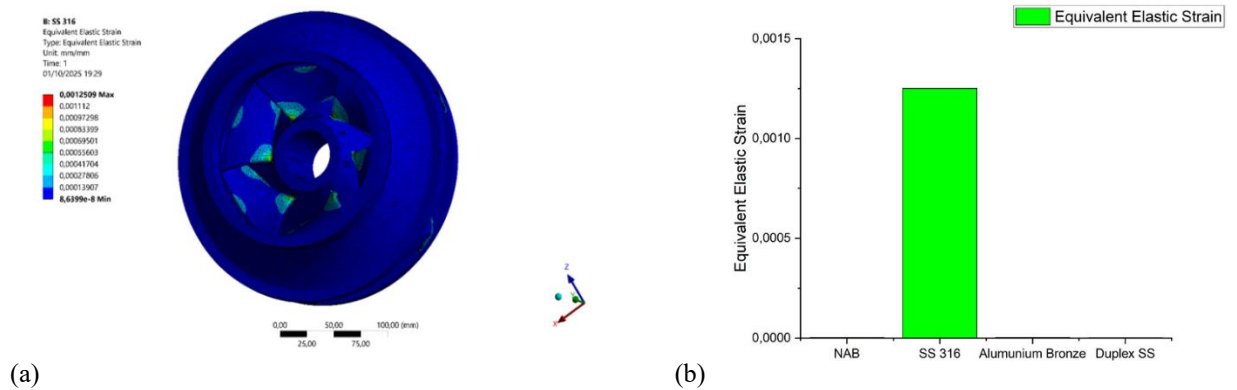
Untuk mengevaluasi respons struktural *impeller* terhadap beban operasi, dilakukan analisis *equivalent elastic strain* dan deformasi total pada beberapa variasi material. Kedua parameter ini digunakan untuk menilai kemampuan material dalam menahan regangan elastis serta kestabilan geometris *impeller* akibat pengaruh gaya sentrifugal dan tekanan fluida [9]. Hasil perbandingan *equivalent elastic strain* dan deformasi total antar material disajikan dalam grafik berikut.



Gambar 5. Visualisasi hasil analisis deformasi (a) dan Grafik Total Deformasi (b)

3.3 Analisis Equivalent elastic strain Terhadap Variasi Material

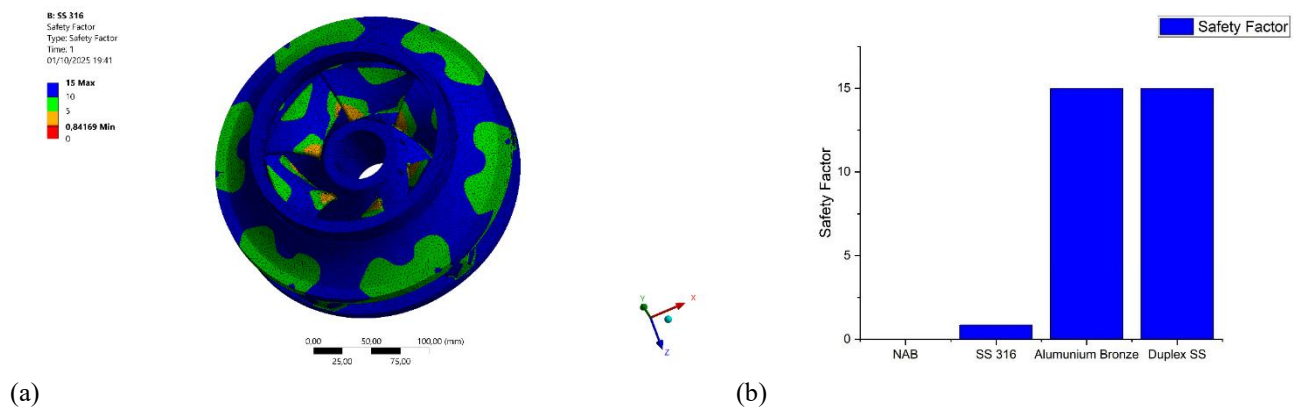
Analisis *equivalent elastic strain* dilakukan untuk mengevaluasi respons regangan elastis *impeller* akibat beban rotasi dan kondisi operasi pompa. Visualisasi distribusi regangan pada material SS 316 serta perbandingan nilai *equivalent elastic strain* antar material ditunjukkan pada gambar berikut.



(a) (b)
Gambar 6. Visualisasi *equivalent elastic strain* pada material SS 316 (a) dan Grafik *Equivalent elastic strain* (b)

3.4 Analisis *Safety factor* Terhadap Variasi Material

Analisis *safety factor* dilakukan untuk mengevaluasi tingkat keamanan *impeller* terhadap beban operasional dan mengidentifikasi potensi area kritis yang berisiko mengalami kegagalan struktural [10]. Visualisasi distribusi *safety factor* pada material SS 316 serta perbandingan nilai *safety factor* antar material ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 7. Visualisasi *safety factor* pada material SS 316 (a) dan Grafik *Safety factor* (b)

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis struktural menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Analysis*), dapat disimpulkan beberapa poin utama sebagai berikut:

1. **Deformasi Total**
Material SS 316 mengalami deformasi total tertinggi sebesar $\pm 0,0918$ mm, sedangkan Duplex *Stainless steel* menunjukkan deformasi paling kecil (mendekati 0 mm), sehingga lebih stabil secara geometris.
2. **Tegangan Von Mises**
Tegangan maksimum terdistribusi pada area sudu dan hub *impeller*. Duplex *Stainless steel* menghasilkan tegangan *Von Mises* lebih rendah dibandingkan SS 316, Aluminium bronze, dan NAB, sehingga memiliki risiko kegagalan struktural yang lebih kecil.
3. **Equivalent elastic strain**
Nilai *equivalent elastic strain* tertinggi terjadi pada SS 316 sebesar $\pm 0,0013$, sedangkan NAB, Aluminium bronze, dan Duplex *Stainless steel* menunjukkan nilai strain sangat rendah hingga mendekati 0.
4. **Faktor Keamanan**
Duplex *Stainless steel* dan Aluminium bronze memiliki *safety factor* tertinggi, mencapai sekitar 15, sedangkan SS 316 memiliki *safety factor* terendah mendekati 1.
5. **Material Optimal**
Berdasarkan nilai deformasi ($< 0,01$ mm), *equivalent elastic strain* (~ 0), dan *safety factor* (~ 15), duplex *stainless steel* merupakan material paling optimal dan direkomendasikan sebagai *impeller* pompa booster.

5. Daftar Pustaka

- [1] M. Radgolchin and M. Anbarsooz, "Investigating the effects of shroud and blade thickness profiles on aeromechanical behavior and fatigue-life of 17-4PH impellers," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 204, no. January, p. 104948, 2023, doi: 10.1016/j.ijpvp.2023.104948.
- [2] R. Ramakrishna, S. Hemalatha, and D. S. Rao, "Analysis and performance of centrifugal pump impeller," *Mater. Today Proc.*, vol. 50, pp. 2467–2473, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.10.364.
- [3] T. Capurso, L. Bergamini, and M. Torresi, "Performance analysis of double suction centrifugal pumps with a novel impeller configuration," *Energy Convers. Manag. X*, vol. 14, no. January, p. 100227, 2022, doi: 10.1016/j.ecmx.2022.100227.
- [4] T. Advances, "<https://jeta.segi.edu.my/index.php/segi> 2022," vol. 7, no. 1, 2022.
- [5] J. Gao, L. Liu, J. Luo, C. Zhou, J. Mao, and L. Liu, "Suppression of hump characteristics of low specific speed centrifugal pumps by the number of impeller blades based on entropy production theory and energy gradient method," *Energy*, vol. 342, no. May 2025, p. 139587, 2026, doi: 10.1016/j.energy.2025.139587.
- [6] N. Mohamed *et al.*, "STRESS ANALYSIS OF VARIOUS DESIGNS OF CENTRIFUGAL PUMP IMPELLERS USING FINITE ELEMENT METHOD."
- [7] T. Capurso, L. Bergamini, and M. Torresi, "Performance analysis of double suction centrifugal pumps with a novel impeller configuration," *Energy Convers. Manag. X*, vol. 14, no. April, p. 100227, 2022, doi: 10.1016/j.ecmx.2022.100227.
- [8] R. Khan *et al.*, "Failure analysis of a centrifugal pump impeller in erosive flow conditions," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 187, no. June 2025, p. 110584, 2026, doi: 10.1016/j.engfailanal.2026.110584.
- [9] "1-s2.0-S095559862500370X-main.pdf."
- [10] J. Shao, J. Zhou, J. Zhang, and X. Dong, "Failure analysis and service life prediction of condensate oil pump impellers in atmospheric-vacuum distillation units," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 186, no. PA, p. 110469, 2026, doi: 10.1016/j.engfailanal.2025.110469.