

**ANALISIS KEGAGALAN PADA POROS POMPA SENTRIFUGAL
107 JA MENGGUNAKAN MEH (METODE ELEMEN HINGGA) DI
PT. PETROKIMIA GRESIK**

Naufal Fajran Nelfandi¹, Arif Rahman Saleh², Fuad Hilmy³

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar

Email: naufal.fajran.nelfandi@students.untidar.ac.id

²Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar

Email: arifrahmansaleh@untidar.ac.id

³Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar

Email: fuadhilmy@untidar.ac.id

ABSTRAK

Proses produksi amoniak di PT. Petrokimia Gresik sering kali terhambat karena kerusakan peralatan, salah satunya adalah karena kegagalan pada poros pompa sentrifugal 107 JA. Pompa ini sebelumnya mengalami penggantian poros pada tanggal 15 Oktober 2021 saat dilakukan *overhaul maintenance* karena porosnya patah di bagian tengah. Penelitian ini akan menganalisis kegagalan poros pompa 107 JA, termasuk spesifikasi material poros, bentuk pola patahan poros, dan beban kerja saat pompa beroperasi. Dengan menggunakan literatur terkait dan simulasi metode elemen hingga pada aplikasi Ansys, diharapkan dapat ditemukan penyebab kegagalan dan dibuat rekomendasi untuk mencegah kegagalan serupa terjadi. Berdasarkan hasil analisis metode elemen hingga menggunakan aplikasi Ansys, poros pompa 107 JA mengalami kegagalan akibat beban torsi yang melebihi nilai *fatigue limit* material *stainless steel* 17-4 PH, di mana poros menerima beban tegangan maksimum sebesar 609,79 MPa di bagian tengah porosnya dekat dengan rumah pasak. Material *stainless steel* 17-4 PH hanya mampu menahan beban tegangan maksimum sebesar 655 MPa sehingga nilai tegangan maksimum yang terjadi pada poros sangat mendekati nilai *fatigue limit* material. Hal inilah yang menyebabkan kegagalan pada poros terjadi.

Kata Kunci: Poros, Torsi, Metode Elemen Hingga

ABSTRACT

The ammonia production process at PT. Petrokimia Gresik is often hindered by equipment damage, one of which is the failure of the shaft in centrifugal pump 107 JA. The pump had previously undergone a shaft replacement on October 15, 2021, during an overhaul maintenance due to a broken shaft in the middle section. This study aims to analyze the failure of the shaft in pump 107 JA, including the material specifications of the shaft, the pattern of shaft fracture, and the workload when the pump is in operation. By utilizing relevant literature and conducting finite element method simulations using Ansys software, it is expected to identify the causes of failure and provide recommendations to prevent similar failures from occurring. Based on the finite element method analysis using Ansys software, the shaft in pump 107 JA failed due to a torque load exceeding the fatigue limit value of stainless steel 17-4 PH material. The shaft experienced a maximum stress load of 609.79 MPa near the keyway area in the middle section. Stainless steel 17-4 PH material can only withstand a maximum stress load of 655 MPa, so the maximum stress experienced by the shaft was very close to the fatigue limit value of the material. This is the reason behind the shaft failure.

Keyword: Shaft, Torque, Finite Element Method

PENDAHULUAN

PT. Petrokimia Gresik merupakan perusahaan petrokimia yang memproduksi beragam jenis produk pupuk dan non pupuk. Produk pupuk mereka meliputi urea, ZA, SP-36, ZK, NPK Phonska, NPK Kebomas, dan pupuk organik Petroganik [6]. Sementara itu, produk non pupuk mereka termasuk amoniak, asam sulfat, gas karbon dioksida, dan asam fosfat. Pabrik 1A mereka menghasilkan 445.000 ton/tahun amoniak yang digunakan sebagai bahan baku produksi pupuk urea yang merupakan salah satu produk unggulan PT. Petrokimia Gresik [6].

Dalam proses produksinya, gas amoniak dihasilkan melalui proses *removal* pada larutan *Benfield* dimana larutan ini berguna sebagai pengikat gas amoniak. Pompa 107 JA digunakan untuk memompa larutan *Benfield* tersebut. Selama periode MBKM (Magang Bersama Kampus Merdeka) periode 1, pompa 107 JA tercatat mengalami masalah seperti vibrasi tinggi, penggantian *bearing* bahkan retak dan patah pada porosnya. Pompa ini mengalami satu kali *overhaul* pada tanggal 15 Oktober 2021 karena mengalami patah pada porosnya [6].

Untuk mencegah kegagalan terulang lagi, diperlukan analisis kegagalan (*failure analysis*). Pendekatan model dan simulasi sistem dengan Metode Elemen Hingga (MEH) dilakukan untuk mempelajari secara detail penyebab patahan poros pompa 107 JA. Hasil simulasi ini diharapkan dapat membantu dalam mengidentifikasi penyebab patahan poros tersebut dan mengambil tindakan pencegahan yang sesuai.

TINJAUAN PUSTAKA

Metode Elemen Hingga (MEH) adalah metode diskritisasi ruang yang digunakan dalam analisis numerik untuk mendapatkan solusi pendekatan dari persamaan diferensial parsial dan persamaan integral [5]. Teori kegagalan *von mises* digunakan dalam industri manufaktur untuk mendesain elemen dengan memperkirakan batas modulus elastis suatu material. Teori ini juga diterapkan

dalam metode elemen hingga, seperti Ansys, untuk mengukur tegangan *von mises* dalam simulasi [3]. Poros digunakan untuk mentransmisikan daya dalam mesin, menerima beban berupa torsi, beban tarikan, beban tekan, dan beban *bending*, serta beban dari getaran [4][9]. Poros pompa 107 JA menggunakan material *stainless steel* 17-4 PH yang merupakan baja tahan karat dengan proses perlakuan panas *precipitation hardening* [7]. Kegagalan yang umum terjadi pada poros pompa adalah kegagalan akibat kelelahan (*fatigue failure*) akibat pembebanan yang berfluktuasi dengan tegangan di bawah kekuatan luluh material [4].

Penelitian oleh Setiawan & Witantyo pada poros pompa sentrifugal GA101A Sub Unit Sintesa Urea PT Petrokimia Gresik menemukan bahwa poros mengalami patah. Patahnya poros bukan disebabkan oleh pembebanan torsi karena letak patah yang jauh dari sisi *inboard*. Menurut hasil penelitian menggunakan aplikasi MEH menunjukkan bahwa adanya *thermal expansion* poros melebihi *clearance bearing* yang menyebabkan gesekan antara poros dan *bearing* yang berujung pada patahnya poros [8].

METODE

Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan selama 2 bulan, diawali dari bulan Januari sampai bulan Maret 2023. Untuk tempatnya akan dilakukan di Laboratorium Komputer Teknik Mesin Universitas Tidar.

Alat dan Bahan

1. Komputer

Komputer yang digunakan untuk menjalankan aplikasi metode elemen hingga memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 1. Spesifikasi Komputer Pendukung

Spesifikasi	<i>Intel Core i3 4005-U 1.7 GHZ with Nvidia 920m Graphic Processor and 8 GB of RAM.</i>
System Type	<i>Windows 8.1 64-bit Operating System, x64-based Processor.</i>

2. *Software* CAD dan CAE

Untuk *software* modeling CAD yang digunakan adalah SpaceClaim dan *software* MEH (Metode Elemen Hingga) yang digunakan adalah Ansys untuk membantu proses penelitian ini.

3. Spesifikasi Pompa *Semi-lean Benfield* 107 JA

Berikut spesifikasi pompa 107 JA yang akan dianalisis:

Tabel 2. Spesifikasi Pompa 107 JA [6]

Manufaktur	Woorthington-Dresser
Penggerak	Turbin Hidraulik 107 JAHT
Tipe Pompa	<i>Centrifugal Pump Double suction</i>
Fungsi	Pompa <i>Semi-lean Benfield</i>
<i>Liquid</i>	<i>Semi-lean Benfield Solution</i> (Sg. Gr 1.249 Kg/m ³)
Kapasitas	1653 m ³ /jam
<i>Pressure Inlet</i>	1,9 kg/cm ² g (<i>max</i>)
<i>Discharge Pressure</i>	36,3 kg/cm ² g (<i>max</i>)
<i>Head</i>	272,8 m
Putaran	1200 RPM
Efisiensi	80%
NPSHA	11,45 m
NPSHR	5,9 m
Daya	715 kW
Material	API 610 class A-B
	Poros: SS17-4 PH
	<i>Casing</i> : SS316
	<i>Impeller</i> : SS17-4 PH
Temperatur <i>inlet</i>	111°C

Tahap - Tahap Penelitian

Metodologi penelitian dirangkum untuk membuat penelitian lebih terstruktur dan sistematis. Tujuan penelitian adalah mendapatkan jawaban terhadap kegagalan poros pompa 107 JA dan mencari langkah rekomendasi untuk memperpanjang umur

pemakaian poros. Berikut langkah-langkahnya:

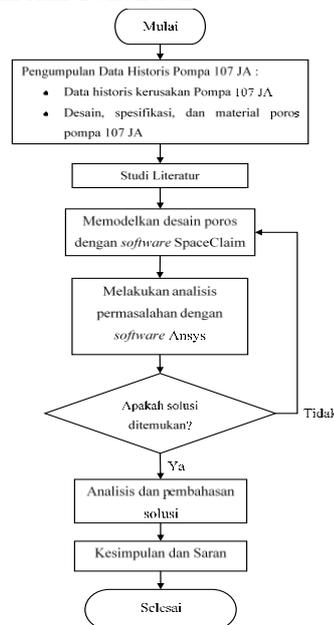
1. Studi lapangan dan identifikasi permasalahan
2. Pengumpulan historikal data pompa 107 JA
3. Mempelajari literatur terkait
4. Melakukan analisis metode elemen hingga

Langkah Analisis Metode Elemen Hingga

Dalam melakukan analisis metode elemen hingga ada beberapa tahapan yang dilakukan untuk membuat hasil simulasi semakin akurat dan menggambarkan kegagalan pada poros yang sebenarnya, berikut tahapannya:

1. Membuat model 3D poros pompa
2. Mengimpor model 3D pompa ke dalam aplikasi Ansys
3. Memasukkan *engineering data* material dan pembebanan torsi pada poros
4. Membuat *meshing* pada model 3D poros
5. Menentukan titik *fixed support* pada kondisi kerja simulasi
6. Melakukan iterasi hasil simulasi untuk mencari data hasil simulasi yang akurat dan independen

Diagram Alir Penelitian

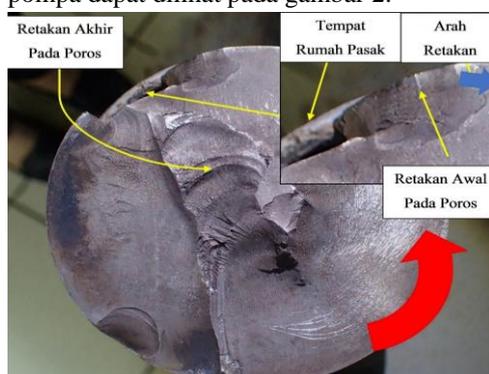


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

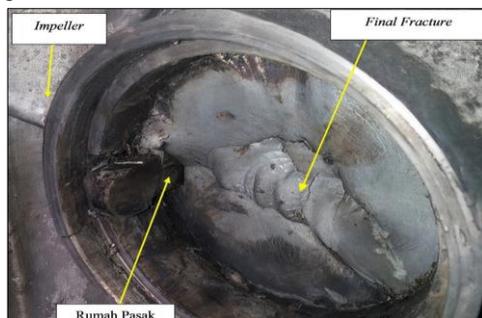
Data Awal Kerusakan

Pada tanggal 15 Oktober 2021, pompa sentrifugal 107 JA mengalami kerusakan berupa patahnya poros pompa setelah dilakukan *overhaul maintenance*. Tercatat pompa mengalami yang vibrasi tinggi mencapai batas *upper warning* sebesar 8 mm/s pada arah vertikal. Sebagai tindakan responsif terhadap vibrasi yang tinggi tersebut, dilakukan *overhaul maintenance* pada pompa tersebut. Namun, selama proses tersebut ditemukan bahwa poros pompa 107 JA mengalami patah. Bentuk patahan poros pompa dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Bentuk Pola Patahan Pada Poros

Patahan poros menunjukkan pola retakan *torsional fatigue* yang dimulai dari sisi luar poros akibat konsentrasi tegangan pada rumah pasak. Poros tidak dapat menahan beban tegangan yang terkonsentrasi, menyebabkan retakan awal pada poros yang kemudian merambat hingga ke tengah poros. Hal ini menghasilkan pola retakan akhir pada poros yang terlihat pada gambar 3.



Gambar 3. Bentuk Pola Patahan Poros Dari Sisi Impeller



Gambar 4. Lokasi Patah Poros Pompa 107 JA

Lokasi patahnya poros terlihat pada gambar 4 dimana terletak di bagian tengah tempat *impeller* pompa berada. Dari lokasi patahannya condong lebih dekat dengan sisi penggerak (*inboard*) pada turbin. Hal ini menimbulkan dugaan awal dimana poros pompa mengalami beban torsi yang besar dari turbin melebihi ambang batas material *stainless steel 17-4 PH* sehingga poros tidak mampu menahannya dan terjadilah kegagalan pada poros.

Untuk mencari nilai torsi yang bekerja pada pompa sebelum terjadi kegagalan bisa dengan menggunakan rumus *Break Horse Power* (BHP). Dengan memasukkan nilai debit keluaran pompa yang didapat dari *Distributed Control System* (DCS) *Plant 1 Amurea* pada tanggal 14 Oktober 2021 (waktu sebelum *overhaul*) dan spesifikasi pompa 107 JA yang ada pada *manual book*, didapatkan data sebagai berikut:

Debit pompa 107 JA (Q): 0.585 m³/sekon
 Putaran pompa (n) : 1350 RPM
 Head pompa (H) : 275.8 m
 Efisiensi pompa (η) : 80%
 Massa jenis *benfield* (P) : 1249 kg/m³
 Suhu *Inlet* : 111 °C

Penghitungan *Water Horse Power* (WHP)

$$\begin{aligned} WHP &= P_{benfield} \cdot g \cdot Q \cdot H \\ &= 1249 \cdot 9.81 \cdot 0.585 \cdot 275.8 \\ &= 1976885.76 \text{ watt} \end{aligned}$$

Penghitungan *Brake Horse Power* (BHP)

$$\begin{aligned} BHP &= \frac{WHP}{\eta} = \frac{1806907.38}{80\%} \\ &= 2471107.2 \text{ watt} \end{aligned}$$

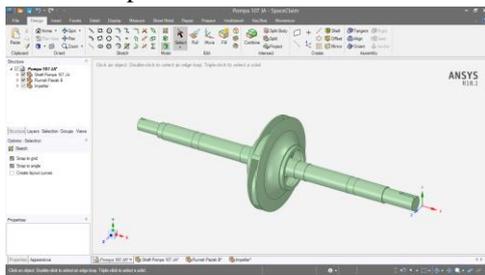
Penghitungan torsi

$$\begin{aligned} \text{Torsi} &= \frac{60 \cdot BHP}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{60 \cdot 2471107.2}{2 \cdot \pi \cdot 1350} \\ &= 17480 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Sehingga torsi yang bekerja pada pompa 107 JA sebelum terjadinya *overhaul* pada tanggal 14 Oktober 2021 adalah sebesar 17480 Nm. Besaran torsi ini nantinya akan di masukan ke dalam aplikasi Ansys sebagai data *input* beban yang bekerja pada saat pompa beroperasi.

Permodelan Poros Pompa 107 JA ke Dalam Bentuk 3D

Setelah dilakukan perhitungan untuk mencari besar beban pompa saat beroperasi, poros pompa dimodelkan ke dalam bentuk 3D menggunakan aplikasi SpaceClaim. Permodelan didasarkan dari *drawing* pompa 107 JA yang didapatkan dari *database* PT. Petrokimia Gresik. Berikut gambar 5 adalah gambar 3D poros pompa 107 JA yang sudah di *assembly* bagiannya yakni poros, *impeller* dan rumah pasak.



Gambar 5. Desain 3D Poros Pompa 107 JA

Input Nilai Mechanical Properties Material Stainless Steel 17-4PH

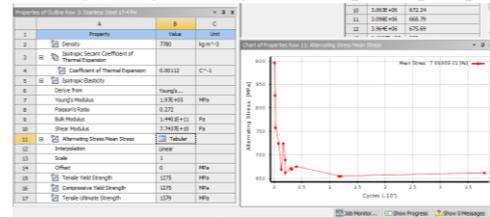
Berikut nilai *mechanical properties* dari material *stainless steel* 17-4PH yang diambil dari *datasheet* AKSteel mengenai sifat material tersebut :

Tabel 3. Nilai *Mechanical Properties* *Stainless Steel* 17-4 PH [1]

Density material	7.78 g/cm ³
Ultimate Tensile Strength	1379 MPa
Yield Tensile Strength	1275 MPa
Modulus Elasticity	1.97 x 10 ⁵ MPa
Bulk Modulus	1.4401 x 10 ¹⁰ Pa
Poisson's Ratio	0.272
Shear Modulus	7.7437 x 10 ¹⁰ Pa
Specific Heat Capacity	0.46 kJ/kg/K
Thermal Conductivity	22.5 W/m-k

Setelah didapatkan nilai *mechanical properties* *stainless steel* 17-4PH dapat kita

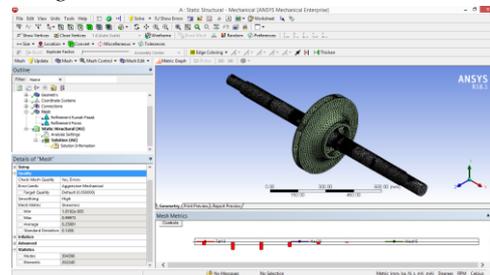
masukan ke dalam aplikasi Ansys sebagai data *input engineering* material poros pompa.



Gambar 6. Nilai *Mechanical Properties* Material Dalam Aplikasi Ansys

Meshing

Meshing untuk model poros pompa 107 JA menggunakan metode otomatis dimana menurut data hasil *mesh metric* menggunakan *meshing* jenis tetrahedron, *hex dominant* dan *wedge*.



Gambar 7. Desain Poros Pompa 107JA Yang Sudah Diberi *Meshing*

Pada bagian rumah pasak dimana *impeller* dipasang dilakukan *refinement* untuk memberikan *mesh* lebih banyak karena di area ini letak poros patah sehingga perlu data yang lebih akurat dengan cara *refinement* ini.

Untuk menunjukkan kualitas dari *meshing* digunakan metode *skewness* dimana pada pemberian *meshing* ini menghasilkan nilai *skewness* rata-rata sebesar 0.25881 dimana nilai ini sangat baik sesuai petunjuk *meshing* dari Ansys.

Tabel 4. Nilai Kualitas *Skewness* Dari Ansys

Skewness mesh metrics spectrum:

Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Melakukan Grid Independence Test Pada Simulasi MEH

Untuk mengevaluasi akurasi hasil simulasi, dapat dilakukan verifikasi berupa variasi jumlah *mesh*. Jika hasil simulasi tidak banyak berubah atau tidak sensitif terhadap

variasi jumlah *mesh* yang diberikan, maka hasil simulasi dianggap independen, artinya hasilnya tidak bergantung pada jumlah *mesh* lagi. Metode ini sering disebut sebagai "*mesh sensitivity test*" atau "*Grid Independence Test*" (GIT).

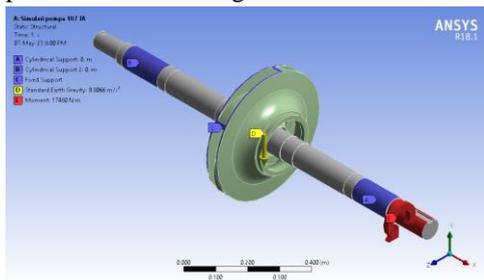


Gambar 8. Hasil *Grid Independence Test* Pada Simulasi

Seperti yang terlihat pada gambar 8 kurva *von mises stress* mulai terlihat stabil saat jumlah *element* sebanyak 129004, artinya pada jumlah *element* ini data hasil simulasi sudah independen dan tidak bergantung lagi dengan jumlah *mesh*. Namun untuk ukuran *mesh* minimal yang akan dipakai pada simulasi ini akan dipilih di angka 15 mm dimana menghasilkan jumlah *nodes* sebanyak 304396 dan *element* 202240.

Menentukan *Boundary Condition* Simulasi MEH

Batas kondisi kerja yang dipakai untuk simulasi ini adalah pemberian tumpuan, pembebanan torsi di ujung poros serta pembebanan standar gravitasi bumi.



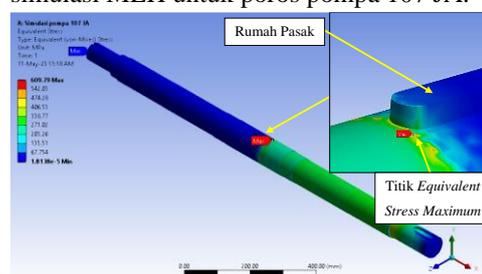
Gambar 9. Batas Kondisi Kerja Simulasi Poros Pada Aplikasi Ansys

Pada Gambar 9, terlihat batas kondisi kerja simulasi menggunakan aplikasi Ansys untuk analisis ini. Torsi yang bekerja pada poros saat pompa beroperasi adalah 17480 Nm, terletak diujung poros sesuai dengan kondisi aktual. Poros didukung oleh *bearing*

di kedua sisinya, berfungsi sebagai *cylindrical support* untuk mencegah gerakan radial poros. Sementara itu, *fixed support* ditempatkan di sisi terluar *impeller*, dengan asumsi *impeller* tidak bergerak secara *axial* maupun radial karena ditahan oleh rumah pasak.

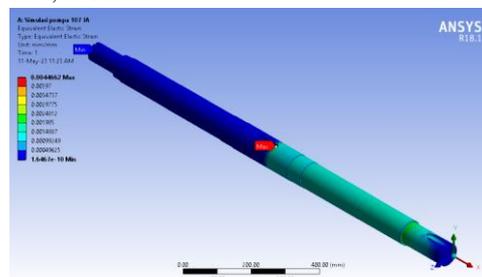
Hasil Analisis MEH Untuk Poros Pompa 107 JA

Setelah kondisi kerja pompa 107 JA sudah diberikan mendekati kondisi aktualnya maka bisa kita *solve* di aplikasi Ansys untuk mendapatkan hasil analisisnya. Berikut hasil simulasi MEH untuk poros pompa 107 JA.



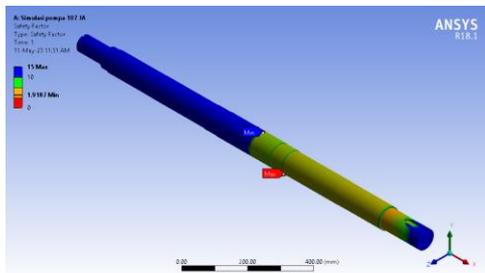
Gambar 10. Hasil *Equivalent Stress Maximum* Pada Poros Pompa 107 JA

Gambar 4.10 menunjukkan bahwa titik *equivalent stress maximum* (*von mises*) terletak dekat dengan rumah pasak di sekitar area *impeller* pada poros. Posisinya lebih condong ke area *inboard* pada poros. Berdasarkan data kerusakan pompa 107 JA, kegagalan poros terjadi di tengah poros yang lebih condong ke area *inboard*. Dengan demikian, hasil simulasi ini sesuai dengan kondisi kegagalan yang sebenarnya. Nilai *equivalent stress maximum* (*von mises*) pada poros dengan beban torsi 17480 Nm adalah 609,79 MPa.



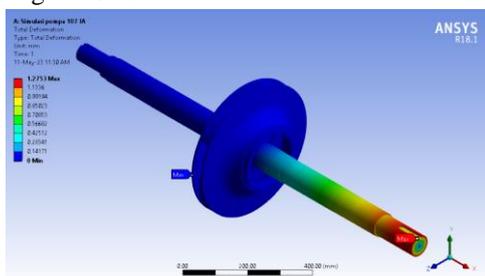
Gambar 11. Hasil *Equivalent Elastic Strain* Pada Poros Pompa

Gambar 11 menunjukkan hasil *equivalent elastic strain max* yang terjadi pada poros pompa 107 JA dimana berada di sekitar rumah pasak tempat *impeller* pompa dipasang. Besar *equivalent elastic strain max* yang terjadi pada poros adalah 4.4662×10^{-3} mm/mm.



Gambar 12. Hasil *Safety Factor* Pada Poros Pompa 107 JA

Pada Gambar 12 menunjukkan grafik persebaran *Safety Factor* (SF) yang terjadi pada poros dimana nilai *safety factor* terkecil berada area rumah pasak yakni tempat poros patah dimana memiliki nilai *safety factor* di angka 1.9187.



Gambar 13. Hasil *Total Deformation* Yang Terjadi Pada Poros Pompa 107 JA

Gambar 13 Menunjukkan area yang mengalami total deformasi pada poros dimana terletak di pusat torsi berada. Area ini merupakan daerah penyambung antara turbin dan pompa dimana menurut hasil analisis visual, titik total deformasi berada di area rumah pasak dimana *coupling* dari turbin 107 JAHT terpasang. Total deformasi maksimum yang terjadi pada poros adalah sebesar 1.2753 mm.

KESIMPULAN

Dari data dari hasil simulasi MEH yang telah dilakukan menggunakan aplikasi

Ansysis, poros menerima beban torsi 17480 Nm menghasilkan nilai tegangan maksimum sebesar 609.79 MPa. Nilai tegangan maksimum yang dapat ditoleransi material *stainless steel* 17-4 PH sesuai dengan data S-N material yang dikeluarkan oleh perusahaan Boeing adalah sebesar 655 Mpa [2]. Nilai tegangan maksimum yang terjadi pada poros ini sangat mendekati nilai tegangan maksimum material dimana hanya terpaut 6.9% saja. Hal ini yang diduga menjadi penyebab kegagalan pada poros terjadi.

Total deformation pada pompa terjadi di area pusat torsi dimana area ini sangat rawan terjadi *misalignment* terutama pada saat pemasangan *coupling* penyambung antara turbin dan pompa. Defleksi maksimum yang terjadi pada pompa adalah sebesar 1.2753 mm. Nilai defleksi ini erat hubungannya dengan momen *bending* dimana semakin besar nilai defleksinya maka nilai momen *bending*-nya juga akan semakin besar. Semakin besar momen *bending* yang terjadi pada poros dapat membuat poros berputar dengan tidak stabil dan membuat vibrasi yang tinggi pada saat pompa bekerja. Untuk mengurangi momen *bending* yang terjadi pada poros dapat dilakukan *balancing* yakni berupa pemberian sudut saat pemasangan *coupling* dengan menggunakan *filler* berupa *plat* sebesar nilai defleksi yang terjadi pada poros dengan arah yang berlawanan (*mirroring*) yang bertujuan agar momen *bending*-nya dapat saling menghilangkan (*cancelling*) sehingga dapat membuat poros berjalan lebih stabil.

SARAN

Menambah jumlah pompa sentrifugal yang ada agar ada pompa yang dalam mode *standby* sehingga ketika ada pompa yang akan di periksa atau bahkan di *overhaul*, beban yang ada pada pompa tersebut tidak dialihkan pada pompa yang lain, melainkan pada pompa yang dalam mode *standby* tersebut, sehingga tidak ada pompa yang bekerja melebihi beban kerja yang seharusnya.

Mematuhi prosedur pemasangan poros pompa khususnya pada bagian *coupling* karena bagian ini rawan terjadi *misalignment* yang dimana dapat menyebabkan vibrasi yang tinggi ketika tidak dipasang dengan benar. Hal tersebut dapat membuat pompa berjalan dengan tidak mulus dan juga menambah beban yang ada pada pompa sehingga dapat membuat kegagalan pada pompa terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] AKSteel. (2018). *ARMCO® 17-4 PH® STAINLESS STEEL*. Ohio: AKSteel International.
- [2] Boeing. (1969). *Fatigue Properties of 17-4 PH and 15-5 PH Steel in the H900 and H1050 Condition*. Pennsylvania: The Boeing Company.
- [3] Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2011). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. New York: The McGraw-Hill Companies.
- [4] Committee, A. H. (2002). *ASM Metals Handbook Vol. 11; Failure Analysis and Prevention*. Ohio: ASM International.
- [5] Cook, R. M. (2002). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. New York: John Wiley & Sons.
- [6] Gresik, P. (2021). *Database Pabrik Amoniak*. Gresik: PT. Petrokimia Gresik.
- [7] Nurhadyan, G. (2011). *Analisa Kegagalan Shaft Stainless Steel 17-4 PH Pada Pompa Sentrifugal 107-JC Di Pabrik 1 Plant Amonnia PT. Petrokimia Gresik*. Surabaya: Teknik Material Metalurgi-ITS Surabaya.
- [8] Setiawan, A., & Witantyo. (2016). *Analisa Kegagalan Poros Pompa Centrifugal Multistage (GA101A) Sub Unit Sintesa Urea PT. Petrokimia Gresik*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [9] Sularso, & Suga, K. (2004). *Dasar Perencanaan Dan Pemilihan Elemen Mesin*. Jakarta: PT. Pranya Paramita.