

ANALISIS KEGAGALAN PADA KOMPONEN KRITIS *HYDRAULIC AXIAL PUMP* DENGAN KAPASITAS 2000 LITER PER SECOND MENGGUNAKAN METODE *FAULT TREE ANALYSIS*

*Grandy Yustisio Rizaldi Ginting, Gunawan Dwi Haryadi² Yusuf Umardani²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. H. Soedarto, SH, Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*Email: grandyginting@gmail.com

Abstrak

Pompa Mesin dikatakan ideal pada prinsipnya jika semua energi yang dihasilkan dapat berhasil diubah. Saat ini mesin-mesin modern didesain untuk bekerja secara otomatis, dan pada umumnya mesin-mesin tersebut bekerja dengan kecepatan tinggi atau putaran, dimana getaran yang terjadi merupakan getaran frekuensi tinggi dan tidak lagi dirasakan oleh indera manusia. Salah satu jenis mesin mekanik yang bekerja pada kecepatan tinggi adalah pompa. Pompa adalah mesin yang mengubah energi mekanik menjadi tekanan dalam fluida yang disirkulasikannya. Pompa yang telah lama beroperasi memerlukan penilaian keandalan untuk mengetahui keandalan sistem dan penyebab kegagalan/kerusakan masing-masing komponen. Elemen pompa biasanya menggunakan bantalan bola untuk membantu rotasi poros. Jika sistem mekanis, seperti pompa, menggunakan komponen bantalan beban, indikasi masalah pemrosesan dapat diidentifikasi dari pola getaran yang dihasilkan oleh bantalan. Dalam bisnis, kegagalan sering terjadi karena suku cadang, seperti poros dan bantalan pompa, aus dan memiliki masa pakai yang pendek. Perusahaan menerapkan sistem hidrolik untuk mendapatkan gaya yang lebih besar dari gaya awal yang dilepaskan. Sebagai bagian dari kegagalan pompa, penulis melakukan analisis kegagalan komponen pompa menggunakan metode Fault Tree Analysis (FTA) sehingga penulis dapat menentukan penyebab kegagalan pompa.

Kata kunci: *bearing; fault tree analysis; hidrolik; pompa; poros*

Abstract

A Machines are said to be ideal in principle if all the energy produced can be converted into work. Nowadays modern machines are designed to run automatically, and in general these machines operate at high speed or rotation, where the vibrations that arise are high frequency vibrations and can no longer be felt by the human senses. One of the mechanical machines that operate at high speed is a pump. A pump is a machine that converts mechanical energy into pressure in the fluid it flows. Pumps that have been in operation for a long time need a reliability evaluation to determine the system reliability and the causes of failure / damage for each component. Pump elements generally use bearings to support shaft rotation. If a mechanical system, such as a pump, uses bearing elements, then one indication of a machining problem can be determined from the vibration pattern caused by the bearings. In companies, in general, failures often occur because components, such as the shaft and bearings on the pump, show wear and have a short life. The company applies a hydraulic system to obtain a force greater than the initial force exerted. In connection with the failure that occurs in the pump, the author analyzes the failure of the components contained in the pump using the Fault Tree Analysis (FTA) method so that the author can identify how the pump has failed.

Keywords : *bearing; fault tree analysis; hydraulic; pump; shaft*

1. PENDAHULUAN

Sejak tahun 2018 Pemerintah Kota Semarang melakukan upaya untuk mengurangi dampak dari banjir dengan menggunakan pompa di daerah titik-titik rawan banjir. Pompa merupakan alat yang mengubah energi mekanik menjadi tekanan dan energi kinetik sehingga dapat mewujudkan pengangkutan fluida yang terarah. Terdapat banyak jenis pompa salah satunya adalah pompa hidrolik aksial. Pompa hidrolik aksial ini yang digunakan di Pasar Waru, Kota Semarang yang diproduksi oleh anak bangsa. Pompa hidrolik aksial adalah jenis pompa yang bekerja dengan mengambil minyak dari reservoir hidrolik dan mendorongnya ke dalam sistem hidrolik sebagai aliran. Aliran ini difungsikan dengan mengubahnya menjadi tekanan. Tekanan dibuat dengan menghalangi aliran oli dalam sistem hidrolik.[1]

Komponen pompa pada dasarnya menggunakan bantalan (*bearing*) untuk mendukung putaran pada poros.[2] Pada sistem mekanik, salah satunya pompa, menggunakan elemen bantalan, maka salah satu indikasi kegagalan pada mesin

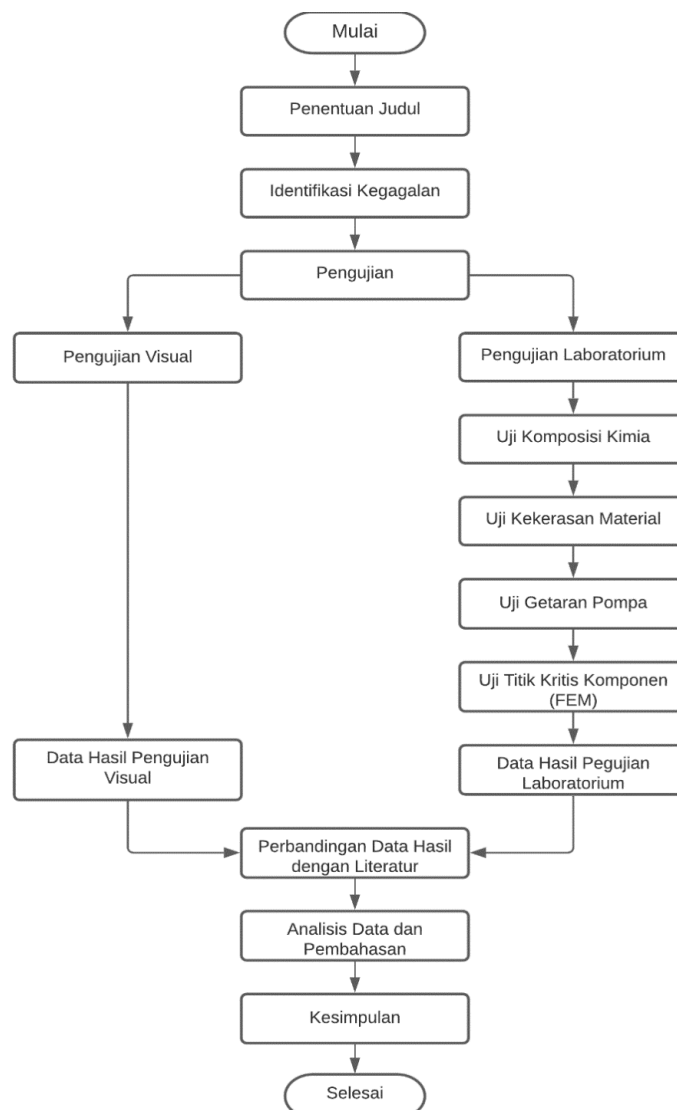
dapat ditentukan dari pola getaran yang ditimbulkan oleh bantalan tersebut. Karakteristik dinamik sistem akan berubah dan cenderung meningkatkan energi getaran yang disebabkan oleh kerusakan atau keausan serta deformasi dari elemen bantalan. Pada pompa umumnya juga sering terjadi kegagalan yang disebabkan karena komponen-komponen, seperti poros dan bearing yang terdapat pada pompa menunjukkan keausan dan memiliki umur pendek.

Analisis kegagalan (*Failure Analysis*) adalah langkah pemeriksaan kegagalan atau kerusakan pada suatu komponen yang mencakup situasi dan kondisi kegagalan atau kerusakan tersebut, sehingga dapat ditentukan penyebab dari kegagalan/kerusakan yang terjadi pada komponen tersebut. Sehubungan dengan adanya kegagalan yang terjadi pada pompa maka perlu dilakukan analisis terhadap komponen yang terdapat pada pompa sehingga dapat mengidentifikasi bagaimana pompa mengalami kegagalan. Metode yang digunakan dalam menganalisis kegagalan pada poros dan bearing pompa digunakan metode Fault Tree Analysis (FTA). Fault Tree Analysis (FTA) adalah metode yang secara langsung berfokus pada mode kegagalan. FTA adalah representasi grafis dari kesalahan utama atau kegagalan kritis yang terkait dengan produk dan penyebab kesalahan dan tindakan pencegahan potensial.[3]

2. METODOLOGI DAN MATERIAL

2.1 Metodologi

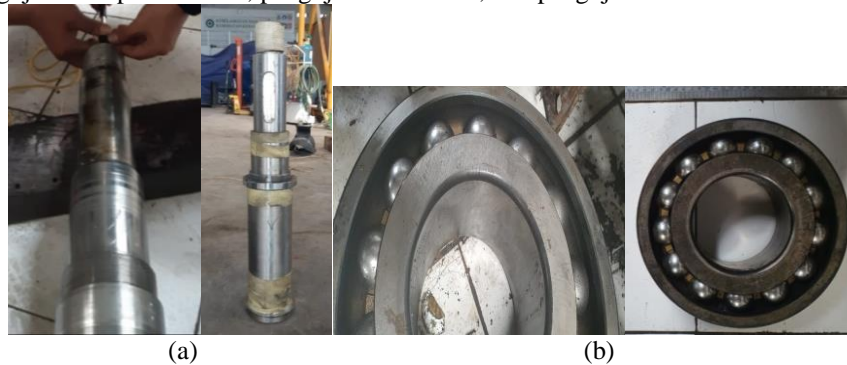
Penelitian ini dilakukan di PT CAMADA SEMARANG yang memproduksi pompa *hydraulics axial pump*. Penelitian ini terdiri dari 5 pengujian yang dilakukan yaitu uji visual, uji komposisi kimia, uji kekerasan material, uji getaran dan uji titik kritis pada komponen kritis. Adapun yang menjadi komponen kritis yang akan dibahas merupakan komponen poros dan komponen bearing pada pompa. Tahapan dalam penelitian dapat dilihat pada **Gambar 1**. berikut :



Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.2 Material

Spesimen uji yang digunakan merupakan poros dan *bearing hydraulic axial pump* dengan material *Austenitic Stainless Steel 316* yang baru dan yang telah rusak. Pada gambar 1 terlihat poros dan *bearing hydraulic axial pump* yang selanjutnya akan dilakukan pengujian komposisi kimia, pengujian kekerasan, dan pengujian titik kritis.



Gambar 2. (a) Bagian poros yang baru dan rusak (b) Bagian *bearing* yang baru dan rusak

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Spesifikasi Pompa

Berikut data spesifikasi dan material pompa dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 1. Data spesifikasi pompa

Jenis Pompa	:	Axial Flow
Drive Type	:	Hydraulic axial piston pump
Kapasitas	:	2000 It/det
Head	:	6-7 m (custom)
Power	:	180 Kw
Tor ue	:	3118 Nm
Speed	:	550 rpm
Efisiensi	:	80%
Weight	:	850 Kg (Approximately)

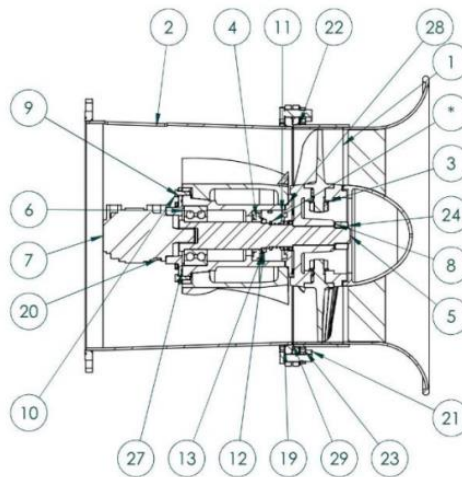
Tabel 2. Data material pompa

Suction Bell (Bellmouth)	:	Carbon Steel (ASTM 36)
Impeller Housing	:	Carbon Steel (ASTM 36)
Wear Ring	:	Stainless steel (SUS 304)
Diffuser	:	Carbon Steel (ASTM 36)
Impeller Vane	:	Stainless steel (SCS 13)
Flange	:	Carbon Steel (ASTM 36)
Driven Shaft	:	SUS 316

Tabel 3. Nama-nama *part* pompa

No	Part	No	Part
1	Bellmouth	16	JIS B 1251
2	Diffuser casing	17	Washer
3	Impeller	18	Sapcer
4	SKF - 7222	19	Washer

5	Shaft	20	M20
6	3322a	21	M30
7	Motor Hydraulic	22	JIS B 1256
8	Ring shaft	23	Hexagon nut
9	Top cover	24	Hexagon nut
10	ISO 7412	25	JIS B 1301
11	Bottom cover	26	Ring
12	Km 20	27	Ring
13	MB 20	28	Ring
14	Mechanical seal	29	Ring
15	Head bolt		



Gambar 3. 2D pompa

3.2 Pengujian Visual

Untuk mengevaluasi kondisi dan memberikan kualitas yang lebih baik dari material atau komponen poros dan *bearing*, dilakukan uji visual. Uji Visual dilakukan di Workshop PT. Camada Jaya Teknindo.



Gambar 4. Hasil uji visual

3.3 Pengujian Komposisi Kimia

Dari pengujian komposisi didapatkan persentase kandungan kimia untuk poros baru dan poros yang sudah rusak. Data pengujian tersebut dapat dibandingkan dengan persentase kandungan kimia poros yang normal berdasarkan referensi. Pengujian komposisi kimia ini menggunakan standar ASTM E1086-14. Tabel 4 dan Tabel 5 menampilkan data pengujian komposisi kimia pada poros baru dan poros yang sudah rusak.

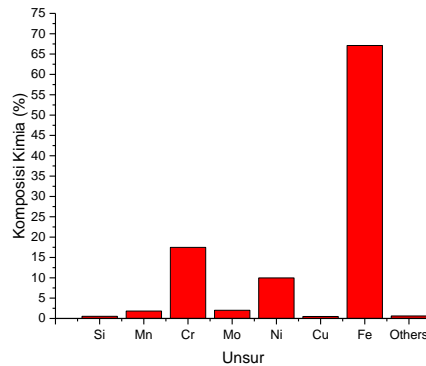
Tabel 4. Data pengujian komposisi kimia material poros baru [4]

Unsur	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	C
<i>Chemical Composition (%)</i>	17,47	9,97	2,01	1,82	0,53	0,49	0,02

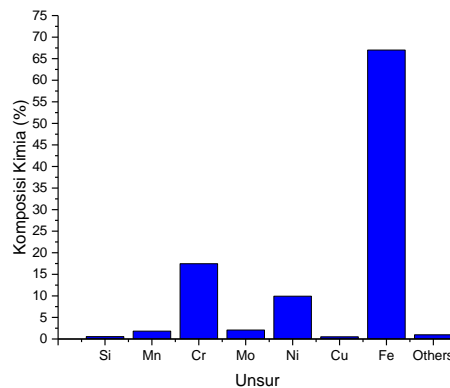
Tabel 5. Data pengujian komposisi kimia material poros yang rusak [4]

Unsur	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	C
<i>Chemical Composition (%)</i>	17,45	9,93	2,08	1,82	0,55	0,5	0,02

Dari data pengujian kedua spesimen diatas, jika dibandingkan dengan komposisi kimia baja tahan karat austenit tipe 316 normal yang berdasarkan Data Sheet AK Steel Corporation tahun 2007 memiliki syarat prosentase C, Mn, dan Si maksimal 0.08%, 2%, 0,75%, dan Ni, Mo, dan Cr diantara 10-14%, 2-3%, 16-18% maka kedua spesimen baja tersebut termasuk kedalam baja tahan karat austenit tipe 316.



Gambar 5. Grafik data pengujian komposisi kimia poros baru



Gambar 6. Grafik data pengujian komposisi kimia poros yang rusak

Gambar di atas merupakan gambar grafik dari data uji komposisi kimia poros baru dan poros yang rusak. Data pengujian tersebut menjelaskan perbedaan prosentase untuk beberapa unsur pada kedua poros yang telah diuji. Presentase terbesar dari unsur poros baru adalah Fe (67,1%), unsur-unsur yang lain juga dapat dilihat pada grafik di bawah ini masing-masing untuk Cr, Ni, Mo, Mn, Si, dan Cu adalah 17,56%, 9,97%, 2,01%, 1,82%, 0,53% dan 0,49%. Disisi lain data pengujian komposisi poros yang rusak adalah Fe (67%), unsur-unsur yang lain juga dapat dilihat pada grafik di bawah ini masing-masing untuk Cr, Ni, Mo, Mn, Si, dan Cu adalah 17,45%, 9,93%, 2,08%, 1,82%, 0,55% dan 0,5%.

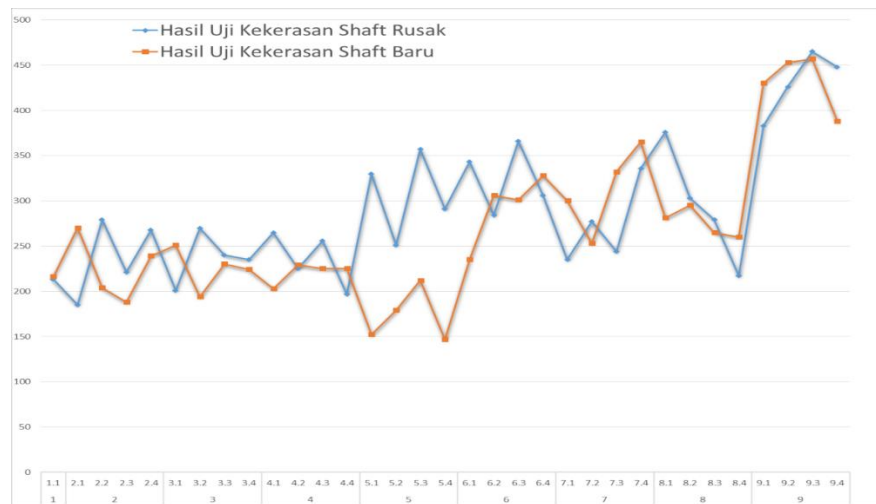
Dari data pengujian di atas dapat dijelaskan bahwa poros baru dan poros yang rusak mempunyai komposisi yang hampir sama. Jadi dilihat dari pengujian di atas standar pemilihan material yang didasarkan dari komposisi unsur sudah sama.

3.4 Pengujian Kekerasan

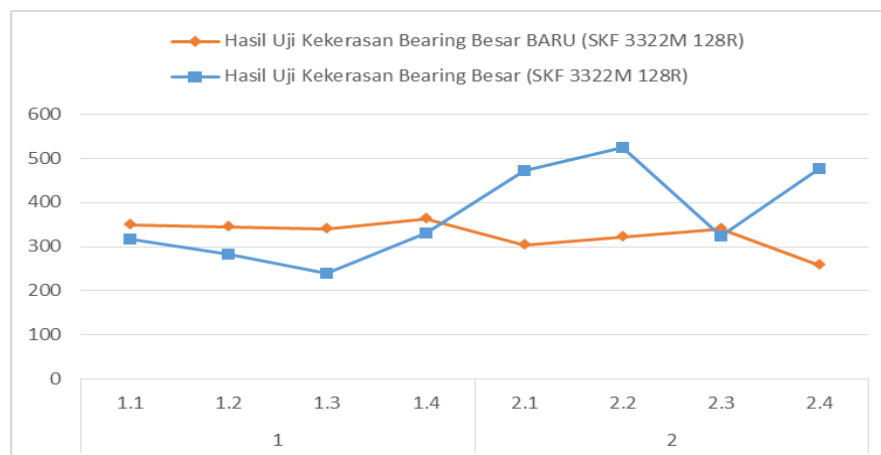
Untuk mengetahui nilai kekerasan spesimen pada penelitian ini, dilakukan pengujian kekerasan dengan alat *Leeb Hardness Tester*. Alat uji ini menggunakan prinsip *Rebound*, yaitu pegas mendorong *impact body* melalui tabung pengarah sehingga menumbuk benda uji. *Impact Body* menumbuk benda uji tanpa hambatan, magnet yang ada menghasilkan tegangan dalam sistem kumparan yang mengelilingi tabung pengarah *impact body*. Indentor yang biasanya terbuat dari "tungsten carbide" atau "diamond ball", yang terletak di ujung *impact body*, menumbuk benda uji, menyebabkan *impact body* memantul dari permukaan benda uji dengan kecepatan yang lebih lambat. Lebih lunak benda uji, akan lebih besar bekas lekukan yang terjadi pada benda uji yang menyebabkan kehilangan energi yang lebih besar dan kecepatan pantulan yang lebih lambat, yang pada akhirnya menghasilkan tegangan lebih rendah.

Pengujian menggunakan 4 spesimen, yaitu spesimen poros baru dan yang sudah rusak, dan spesimen bearing baru dan yang sudah rusak. Pada spesimen poros dilakukan penetrasi sebanyak tiga puluh tiga kali. Pada spesimen bearing

dilakukan penetrasi sebanyak delapan kali. Dari nilai kekerasan yang diperoleh, dapat dibuat grafik distribusi pengujian kekerasan tiap titik pengujian seperti dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7. Grafik nilai kekerasan poros baru dan yang sudah rusak



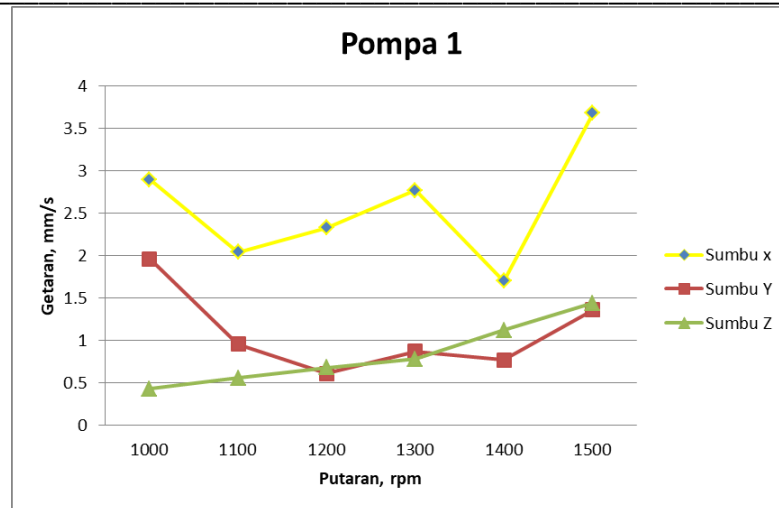
Gambar 8. Grafik nilai kekerasan bearing baru dan yang sudah rusak

Dari grafik pengujian diatas memperlihatkan bahwa telah terjadi kenaikan kekerasan yang cukup tinggi pada spesimen yang telah rusak. Kekerasan pada spesimen poros yang sudah rusak memiliki nilai yang tinggi jika dibandingkan dengan spesimen poros yang baru dan juga kekerasannya hampir sama di beberapa titik. Kekerasan pada spesimen bearing yang rusak juga memiliki nilai yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan spesimen bearing yang baru.

Kekerasan yang sangat fluktuatif pada spesimen poros tersebut disebabkan karena perlakuan panas (*heat treatment*) yang dialami poros pada saat mengalami getaran atau proses kerja pompa yang berbeda-beda pada setiap titiknya [5]. Hasil pengujian kekerasan pada poros yang rusak cenderung lebih tinggi dibanding poros yang baru, hal ini dapat menjelaskan bahwa dengan tingkat kekerasan yang tinggi menghasilkan laju perambatan retak yang cepat dibanding dengan tingkat kekerasan yang rendah.

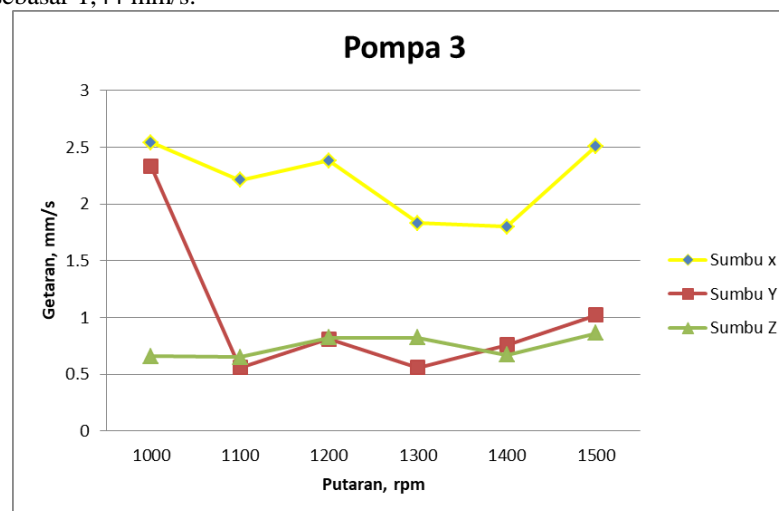
3.5 Pengujian Getaran

Untuk mengetahui besar nilai getaran pompa pada penelitian ini, dilakukan pengambilan data pengujian getaran pada pompa 1 dan pompa 3. Dari nilai pengujian getaran yang diperoleh, dapat dibuat grafik pengujian getaran tiap sumbu pengujian seperti dapat dilihat pada Gambar 9 sampai Gambar 10.



Gambar 9. Grafik nilai pengujian getaran pada pompa 1

Pada grafik pompa 1 di atas yang ditunjukkan pada warna kuning yaitu sumbu X, hasil dari pengambilan data pada sumbu X yang paling besar pada putaran 1500 yaitu 3,68 mm/s, pada sumbu Y berwarna merah yang paling besar putaran 1000 dengan nilai 1,96 mm/s, dan pada sumbu Z berwarna hijau yang paling besar putaran 1500 yaitu 1,44 mm/s, hasil yang paling besar terdapat pada sumbu X putaran 1500 dengan nilai 3,68 mm/s dan yang kecil terdapat pada sumbu Z dengan putaran 1500 sebesar 1,44 mm/s.

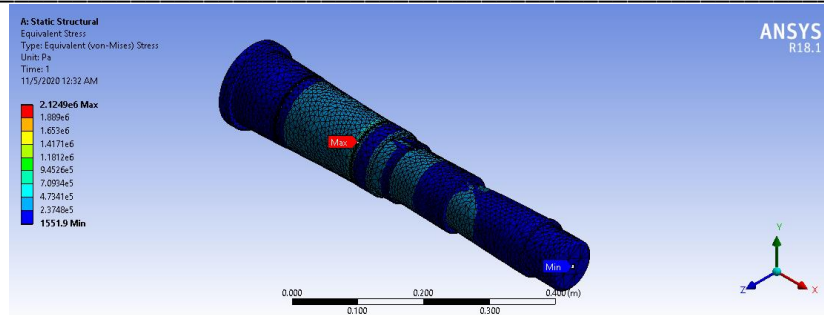


Gambar 10. Grafik nilai pengujian getaran pada pompa 3

Pada grafik pompa 3 di atas yang ditunjukkan pada warna kuning yaitu sumbu X, hasil dari pengambilan data pada sumbu X yang paling besar pada putaran 1000 yaitu 2,54 mm/s, pada sumbu Y berwarna merah yang paling besar putaran 1000 dengan nilai 2,33 mm/s, dan pada sumbu Z berwarna hijau yang paling besar putaran 1500 yaitu 0,86 mm/s, hasil yang paling besar terdapat pada sumbu X putaran 1000 dengan nilai 2,54 mm/s dan yang kecil terdapat pada sumbu Z dengan putaran 1500 sebesar 0,86 mm/s.

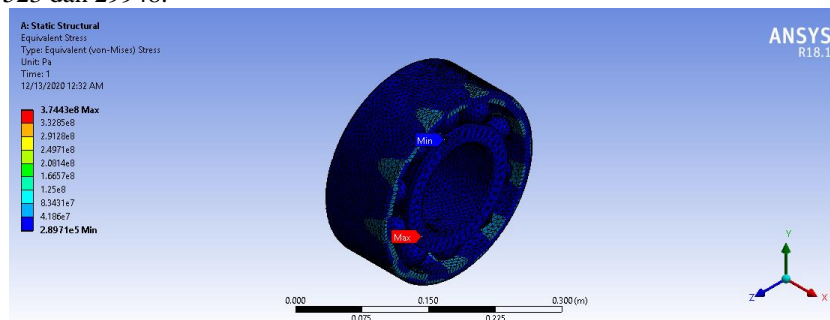
3.6 Pengujian Titik Kritis

Pengujian titik kritis menggunakan ANSYS digunakan sebagai data pendukung untuk menunjukkan titik kritis dari komponen yang diuji. Berikut merupakan hasil dari simulasi *Von Mises Stress* pada pengujian titik kritis pada software ANSYS.



Gambar 11. Hasil simulasi *Von Misses Stress* pada poros

Setelah dilakukan simulasi pada spesimen poros menggunakan ANSYS, didapatkan titik kritis pada tegangan von-Mises maksimum sebesar $2,1249 \times 10^6$ Pa dan tegangan von-Mises minimum sebesar 1551,9 Pa. Dengan jumlah nodal dan elemen sebanyak 51523 dan 29948.

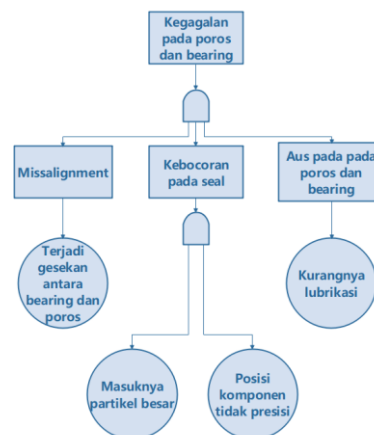


Gambar 12. Hasil simulasi *Von Misses Stress* pada bearing

Setelah dilakukan simulasi pada spesimen bearing menggunakan ANSYS, didapatkan titik kritis pada tegangan von-Mises maksimum sebesar $3,7443 \times 10^8$ Pa dan tegangan von-Mises minimum sebesar $2,8971 \times 10^5$ Pa. Dengan jumlah nodal dan elemen sebanyak 103834 dan 59317.

3.7 Analisa Kegagalan menggunakan Diagram *Fishbone*

Kegagalan mekanik dapat didefinisikan sebagai perubahan ukuran, bentuk, atau struktur properti material, mesin atau bagian part mesin itu sendiri yang berpengaruh pada fungsi mesin tersebut [6]. Berdasarkan analisa yang telah dilakukan, diketahui kerusakan apa saja yang terjadi pada *hydraulic axial pump* kapasitas 2000 L/s, kemudian langkah selanjutnya dibuatlah *Fault Tree Analysis (FTA)* diagram untuk memudahkan analisa akar dari kerusakan.



Gambar 13. *Fault Tree Analysis* Diagram

Dari pemeriksaan yang telah dilakukan diketahui bahwa terdapat beberapa kerusakan pada komponen pompa, sehingga perlu penelusuran lebih lanjut mengapa hal tersebut bisa terjadi. Dari hasil penelusuran dan pengamatan langsung terhadap pompa hidraulik, antara lain pada sisi *housing bearing* mengalami kebocoran *mech seal* dikarenakan besarnya getaran yang dialami. *Mach seal* yang mengalami kebocoran juga bisa dikarenakan kurang telitinya dalam melakukan proses *manufacturing* dan pemasangan komponen. *Mech seal* adalah komponen yang digunakan untuk bekerja pada suatu pompa air yang bertujuan agar menstabilkan tidak terjadinya bocor pada fluida kerja di bagian antara pada sisi

housing bearing dengan *hydraulic motor*. Pada beberapa kasus pompa sebelumnya, terdapat *mech seal* yang putus dan *mech seal* yang mengalami permukaan terkikis, sehingga hal tersebut mengakibatkan masuknya air dan beberapa partikel kecil seperti pasir dan lumpur ke dalam *housing bearing*.

Partikel-partikel kecil yang masuk ke *housing bearing* menyebabkan oli pelumas bercampur dengan pasir dan lumpur sehingga terjadi kekurangan pelumas pada *bearing* mengakibatkan bantalan kontak langsung dan mengalami gesekan terhadap poros, sehingga poros dan *bearing* mengalami kerusakan. Gesekan terjadi antara *bearing* yang memiliki nilai kekerasan lebih besar terhadap poros sehingga permukaan poros mengalami keausan. Keausan pada permukaan poros mengakibatkan putaran poros terhadap *bearing* menjadi tidak *balance*, sehingga poros tidak *center*. *Maintenance* yang tidak langsung dilakukan karena untuk mempertahankan jam operasi maksimal menyebabkan kerusakan pada poros pompa karena sistem pelumasan bantalan tidak mencukupi.

4. KESIMPULAN

Dari penelitian ini didapat beberapa kesimpulan mengenai Analisis Kegagalan Pada Komponen Kritis Hydraulic Axial Pump Dengan Kapasitas 2000 Lps Menggunakan Metode FTA, yaitu :

1. Tidak terjadi perubahan komposisi yang signifikan antara 2 spesimen poros baru dan yang sudah rusak.
2. Poros yang rusak memiliki nilai kekerasan sangat tinggi & fluktuatif sehingga akan mudah mengalami kerusakan.
3. Bearing yang rusak memiliki nilai kekerasan yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai kekerasan bearing yang baru, akan tetapi memiliki nilai kekerasan yang sangat tinggi pada titik 2.1 dan 2.2.
4. Data hasil pengujian getaran pompa 1 yang paling besar terdapat pada sumbu X putaran 1500 dengan nilai 3,68 mm/s dan yang kecil terdapat pada sumbu Z dengan putaran 1500 sebesar 1,44 mm/s.
5. Data hasil pengujian getaran pompa 3 yang paling besar terdapat pada sumbu X putaran 1000 dengan nilai 2,54 mm/s dan yang kecil terdapat pada sumbu Z dengan putaran 1500 sebesar 0,86 mm/s. Dari penelitian ini didapat beberapa kesimpulan mengenai Analisis Kegagalan Pada Komponen Kritis Hydraulic Axial Pump Dengan Kapasitas 2000 Lps Menggunakan Metode FTA, yaitu tidak terjadi perubahan komposisi yang signifikan antara 2 spesimen poros baru dan yang sudah rusak. Poros yang rusak memiliki nilai kekerasan sangat tinggi & fluktuatif sehingga akan mudah mengalami kerusakan. Bearing yang rusak memiliki nilai kekerasan yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai kekerasan bearing yang baru, akan tetapi memiliki nilai kekerasan yang sangat tinggi pada titik 2.1 dan 2.2. Data hasil pengujian getaran pompa 1 yang paling besar terdapat pada sumbu X putaran 1500 dengan nilai 3,68 mm/s dan yang kecil terdapat pada sumbu Z dengan putaran 1500 sebesar 1,44 mm/s. Data hasil pengujian getaran pompa 3 yang paling besar terdapat pada sumbu X putaran 1000 dengan nilai 2,54 mm/s dan yang kecil terdapat pada sumbu Z dengan putaran 1500 sebesar 0,86 mm/s.
6. Dari analisa Fault Tree Analysis (FTA) dapat disimpulkan bahwa penyebab utama kerusakan pada poros dan bearing adalah dikarenakan pada sisi *housing bearing* mengalami kebocoran *mech seal* dikarenakan besarnya getaran yang dialami, hal tersebut mengakibatkan masuknya air dan beberapa partikel kecil seperti pasir dan lumpur ke dalam *housing bearing*. Partikel-partikel kecil yang masuk ke *housing bearing* menyebabkan oli pelumas bercampur dengan pasir dan lumpur sehingga terjadi kekurangan pelumas pada bearing mengakibatkan bantalan kontak langsung dan mengalami gesekan terhadap poros, sehingga poros dan bearing mengalami kerusakan. Gesekan terjadi antara bearing yang memiliki nilai kekerasan lebih besar terhadap poros sehingga permukaan poros mengalami keausan. Keausan pada permukaan poros mengakibatkan putaran poros terhadap bearing menjadi tidak *balance*, sehingga poros tidak *center*.

5. REFERENSI

- [1] Prosperetti, A., Zhang, D.Z (1995). Finite-particle-size effects in disperse two-phase flows. *Theoret. Comput. Fluid Dynamics* 7, 429–440
- [2] Firman, S. (2018). Analisa Pengaruh Kerusakan Ball Bearing Terhadap Kinerja Pompa Ballast Di Mv. Dk 02 (Doctoral Dissertation, Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang).
- [3] R. B. Waghmode, L. Y.; Patil, "An Overview of Fault Tree Analysis (Fta) for Reliability Analysis," *J. Eng. Res. Stud.*, vol. IV, no. March 2013, pp. 06–08, 2016
- [4] CATUR PRASETYO, H. A. T. T. A., & HARTUTUK NINGSIH, T. R. I. (2018). Analisa Pengaruh Heat Treatment Terhadap Kekerasan Material Baja S45C Untuk Aplikasi Poros Roda Sepeda Motor. *Jurnal Teknik Mesin*, 6(2).
- [5] Collins. J.A.: *Failure of Materials in Mechanical Design*, 2nd ed., John Wiley & Sons Inc, NY (1993).
- [6] Awali, J., & Asroni, A. (2013). Analisa kegagalan poros dengan pendekatan metode elemen hingga. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 2(2).
- [7] ASM Team, 1986. *ASM Handbook Volume 11 Failure Analysis and Prevention*, ASM International.
- [8] Haryadi, G. D., Pertiwanda, S., & Ismail, R. (2017, August). Analisa Kegagalan pada Poros Circulating Water Pump (CWP) pada Pembangkit Listrik. In *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XVI-2017*.
- [9] Callister, W.D.: *Materials Science and Engineering an Introduction*, 7th ed., John Wiley & Sons Inc, NY (1940).

-
- [10] Shigley, Joseph E., dan Larry D. Mitchell. 1983. Perencanaan Teknik Mesin Edisi Keempat (Gandhi Harahap, Penerjemah). Jakarta. Erlangga.