

DETEKSI KEGAGALAN KOMPONEN POMPA SENTRIFUGAL MENGGUNAKAN METODE ANALISIS GETARAN

Oxa Nurmansyah*¹, Hanifah Widiastuti*² and
Naufal Abdurrahman Prasetyo*³

^{1,2,3}Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan
Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

*¹E-mail: oxanew203@gmail.com

Abstrak

Kerusakan pada komponen pompa mengakibatkan gangguan operasional yang signifikan. Pengukuran getaran dilakukan pada beberapa titik pompa untuk memperoleh data kondisi mesin. Data getaran kemudian dianalisis dalam domain frekuensi untuk menghasilkan spektrum getaran yang mencerminkan kondisi aktual dari komponen-komponen pompa. Hasil analisis menunjukkan adanya frekuensi-frekuensi abnormal yang mengindikasikan permasalahan pada komponen *bearing* dan ketidaksesuaian pada rumah *bearing* (*bearing housing*) yang mengalami keausan. Sebagai tindak lanjut, dilakukan pembongkaran pada pompa. Ditemukan bahwa rumah *bearing* mengalami keausan yang menyebabkan *bearing* bergetar. Tindakan perbaikan yang dilakukan meliputi proses *bushing* pada rumah *bearing* untuk mengembalikan dimensi aslinya dan penggantian *bearing* baru agar pompa kembali bekerja optimal. Penelitian ini bertujuan untuk mendeteksi kegagalan komponen pompa *sentrifugal* menggunakan metode spektrum getaran, dengan memanfaatkan alat *Vibration analyzer* sebagai instrumen utama pengambilan data vibrasi. Metode spektrum getaran terbukti efektif dalam mendeteksi dan mengidentifikasi kerusakan komponen secara dini, serta menjadi dasar dalam pengambilan keputusan pemeliharaan yang tepat. Disarankan agar penelitian selanjutnya dilengkapi dengan implementasi sistem monitoring getaran secara real-time menggunakan sensor accelerometer permanen yang dipasang di housing bantalan pada arah radial dan aksial. Data RMS atau getaran velocity yang diperoleh kemudian ditrack secara terus-menerus, dan dihubungkan dengan ambang batas alarm berdasarkan *zone B, C, D* sebagaimana diatur dalam ISO 10816-7.

Kata kunci: *pompa sentrifugal, spektrum getaran, bearing, pemeliharaan prediktif*

Abstract

Damage to pump components results in significant operational disruption. Vibration measurements were carried out at several pump points to obtain machine condition data. The vibration data is then analyzed in the frequency domain to produce a vibration spectrum that reflects the actual condition of the pump components. The results of the analysis show that there are abnormal frequencies which indicate problems with the bearing components and inconsistencies in the bearing housing which is experiencing looseness (oplak). As a follow-up, the pump was dismantled. It was found that the bearing housing was experiencing wear which caused the bearing to vibrate. The corrective action taken includes the bushing process on the bearing housing to restore its original dimensions and replacement of new bearings so that the pump can work optimally again. This research aims to detect failure of centrifugal pump components using the vibration spectrum method, using a vibration analyzer as the main instrument for collecting vibration data. The vibration spectrum method has proven to be effective in detecting and identifying component damage early, as well as being the basis for making appropriate maintenance decisions. It is recommended that further research be equipped with the implementation of a real-time vibration monitoring system using a permanent accelerometer sensor installed in the bearing housing in the radial and axial directions. The RMS or vibration velocity data obtained is then tracked continuously, and linked to alarm thresholds based on zones B, C, D as regulated in ISO 10816 7.

Keywords: *centrifugal pump, vibration spectrum, bearing, predictive maintenance*

1. Pendahuluan

Pompa sentrifugal adalah salah satu model pompa yang sering digunakan untuk industri pengolahan air, seperti air limbah maupun air bersih [1]. Pada perkembangannya, terjadi penurunan kinerja pompa secara mendadak dan ketidakstabilan dalam operasi sering menjadi masalah serius dan mengganggu kinerja sistem secara keseluruhan. Kerusakan yang terjadi pada pompa *sentrifugal* dapat berupa *kavitasi*, *misalignment*, *unbalance*, cacat *impeller* dan cacat bantalan. Salah satu fenomena yang sering dialami oleh pompa adalah kavitasi yang merupakan kondisi saat gelembung uap muncul pada cairan yang dipompa, kavitasi terjadi ketika tekanan lokal pada sisi hisap sudut turun mendekati tekanan uap fluida. Hal ini berlangsung pada tepi depan *impeller*. Energi hisap positif bersih (NPSE) kritis telah dijelaskan sebagai penurunan sebesar 2% dari karakteristik kondisi nonkavitasi [2].

Menurut Girdhar (2004) salah satu cara efektif untuk mendeteksi awal gejala kerusakan mekanik dan elektrik pada peralatan pompa dengan analisis getaran yang menjadi pilihan strategi *predictive maintenance* yang paling sering digunakan [3]. Keuntungannya ialah dapat mengidentifikasi potensi kerusakan sebelum bertambah parah yang bisa menimbulkan *downtime* tidak terjadwal [4]. Hal ini tercapai dengan monitoring getaran mesin yang dilakukan secara terus menerus atau interval yang dijadwalkan. Analisis getaran ini bisa untuk mengetahui kondisi bantalan tanpa menghentikan pompa yang sedang beroperasi. Sinyal getaran diketahui dengan metode *Vibration analyzer* untuk mengidentifikasi percepatan, mendeteksi dan mengukur getaran. Metode ini pada umumnya diletakkan sedekat mungkin dengan bantalan pompa dalam arah *radial* atau *aksial*. Dengan menggunakan *FFT*, sinyal dalam domain waktu diubah menjadi domain frekuensi atau spektrum. Frekuensi cacat bantalan pada spektrum ditunjukkan dengan amplitudo yang tinggi. Getaran adalah gerakan relatif terhadap posisi acuan yang disebabkan oleh suatu gaya. Getaran ini dapat bersifat acak atau periodik. Mesin menghasilkan beberapa gerakan osilasi selama operasi normalnya. Getaran ini bersifat jinak contohnya frekuensi pergerakan bilah, frekuensi sambungan roda gigi, turbulensi pita lebar dari mesin penanganan fluida [5]. Analisis getaran pada pompa dapat memberikan wawasan mendalam terhadap sumber getaran, seperti ketidakseimbangan, *misalignment*, keausan bantalan, atau resonansi yang dapat mempengaruhi kinerja mesin [6]. Selain itu pemeliharaan prediktif diperlukan untuk meminimalisir potensi kerusakan yang terjadi pada pompa dengan cara mengawasi getaran mesin yang berputar untuk mendeteksi kerusakan pada tahap awal untuk menghindari potensi kerusakan lebih lanjut.[7]

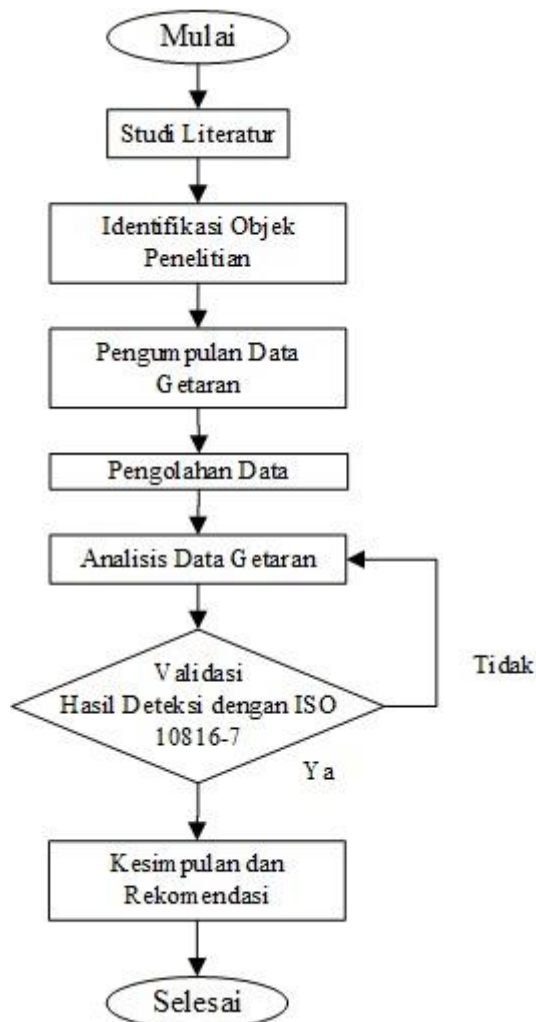
Metode analisis frekuensi berfungsi untuk membandingkan sinyal getaran bantalan baik dengan bantalan rusak. *Impeller* merupakan komponen pompa yang memiliki peran sangat penting karena jika *impeller* mengalami kerusakan maka mengakibatkan penurunan performa pompa atau memicu kerusakan komponen pompa [8]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa indikasi pertama kerusakan bantalan dapat terlihat pada plot frekuensi kisaran tinggi. Selanjutnya, bantalan yang mengalami cacat pada lintasan luarnya, akan meningkatkan amplitudo getaran yang dominan pada daerah frekuensi $3 \times \text{BPFO}$ (197,5 Hz), bantalan yang mengalami kerusakan pada lintasan dalamnya, akan meningkatkan amplitudo getaran dominan pada daerah $4 \times \text{BPFI}$ (435 Hz). Sedangkan kerusakan pada elemen bola, timbul getaran dengan amplitudo dominan pada daerah frekuensi $2 \times \text{BSF}$ (62,5 Hz). Nilai amplitudo pada bantalan kondisi baik adalah 0,802 Volt, sedangkan pada cacat lintasan dalam 1,294 Volt, cacat lintasan luar 1,662 Volt dan cacat pada bola 2,006 Volt [9].

Secara agregat, empat jenis prosedur diagnostik kesalahan adalah berbasis pengetahuan, berbasis model, pendekatan komposit, dan berbasis sinyal [10]. salah satu metode untuk diagnosis kesalahan adalah PCA yang dapat digunakan untuk melakukan seleksi, mereduksi dimensi data dan bisa digunakan untuk mengklasifikasikan kerusakan. Dari metode ini bisa diketahui untuk mengidentifikasi perilaku getaran pompa dengan cara analisis Transformasi Fourier Cepat (FFT) terhadap sinyal getaran untuk mempelajari kandungan spektralnya [11], FFT dipilih karena bisa mengetahui frekuensi dasar kavitasi dengan mudah. Data yang terekam kemudian diproses menggunakan transformasi fourier digital. Selain itu, perawatan prediktif sangat penting untuk mengetahui kerusakan dini yang terjadi pada peralatan sebelum mengalami kerusakan serius, sehingga tidak menyebabkan kerusakan yang lebih besar [12]. Dari analisis getaran tersebut kerusakan yang ditemukan terdapat pada *bearing* dan *bearing housing* yang disebabkan oleh gesekan berlebih selama operasi mesin. Gesekan ini umumnya terjadi akibat pelumasan yang tidak optimal, keausan alami, atau beban kerja berlebih yang menyebabkan *bearing* mengalami kerusakan sehingga merambat ke *bearing housing*, di mana dudukan *bearing* menjadi aus atau melar.

Adapun tujuan yang diharapkan pada penelitian ini adalah bisa mengidentifikasi secara dini adanya gangguan atau kerusakan pada komponen internal pompa dan menganalisis pola getaran yang dihasilkan selama pompa beroperasi. Melalui metode ini, kerusakan dapat diketahui tanpa harus membongkar mesin secara fisik, sehingga mempercepat proses diagnosis dan mengurangi risiko *downtime*. Selain itu, analisis getaran juga membantu menentukan jenis, tingkat keparahan, serta lokasi kerusakan berdasarkan spektrum frekuensi yang muncul. Dengan informasi tersebut, perawatan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*) dapat diterapkan secara lebih efektif, sehingga meningkatkan efisiensi operasional, memperpanjang umur mesin, dan mengurangi biaya perbaikan mendadak. Selain itu, batasan masalah hanya berfokus pada deteksi getaran pompa *sentrifugal* tipe horizontal seperti *unbalance*, *bearing* rusak, dan *misalignment*.

2. Metodologi Penelitian

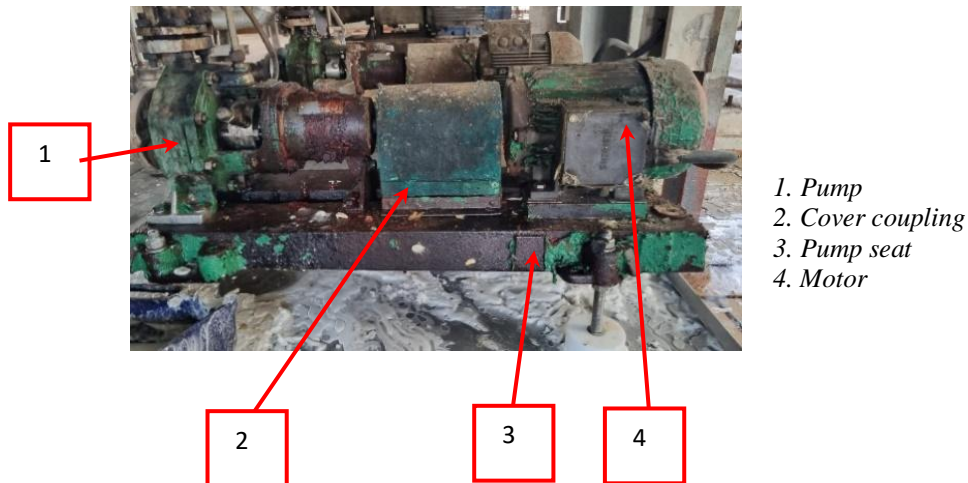
Penelitian ini dilakukan dengan metode gabungan kualitatif dan kuantitatif, yaitu melakukan *observasi* dan pengambilan data terhadap objek penelitian ketika pompa beroperasi. Alat yang digunakan dalam penelitian ini berupa *vibration analyzer* untuk mengambil data vibrasi pada pompa *sentrifugal*. Proses pelaksanaan penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan, dimulai dari identifikasi masalah hingga analisis hasil dan kesimpulan. Adapun tahapan pelaksanaan kegiatan yang dilakukan secara keseluruhan pada penelitian ini dapat dilihat pada diagram berikut.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.1. Pompa sentrifugal

Pompa *sentrifugal* dengan brand *KSB*, tipe *CPK-CMF 25-160*, dirancang khusus untuk aplikasi industri yang membutuhkan ketahanan terhadap media agresif seperti asam (*acid*). Pompa ini merupakan bagian dari seri *CPK* standar kimia *KSB*, yang dikenal dengan desain modularnya, efisiensi tinggi, dan kemudahan dalam perawatan. Berikut gambar pompa *sentrifugal* brand *KSB* dengan tipe *CPK-CMF 25-160* yang akan dianalisis getarannya.



Gambar 2. Pompa *sentrifugal* *CPK-CMF 25-160*

Material yang digunakan pada bagian-bagian utama pompa, seperti *casing*, *impeller*, dan *shaft*, adalah material tahan korosi seperti *stainless steel*, ini memastikan pompa mampu bekerja dengan andal dalam lingkungan kimia berat tanpa cepat mengalami kerusakan. Pompa *CPK-CMF 25-160* memiliki ukuran *inlet* 25 mm dan diameter *impeller* 160 mm, dengan performa optimal pada kisaran aliran dan tekanan tertentu yang sesuai standar *DIN EN ISO 10816-7*.

Standar ini menetapkan metode evaluasi tingkat getaran berdasarkan pengukuran pada bagian mesin yang tidak berputar (misalnya *casing*), seperti pada *housing bearing* pompa. Pompa ini juga dilengkapi dengan *mechanical seal* tahan bahan kimia untuk mencegah kebocoran saat menangani media *acid*. Aplikasi umum dari pompa ini meliputi industri *kimia*, *petrokimia*, *farmasi*, serta pengolahan air limbah industri yang mengandung zat-zat korosif. Pompa *CPK-CMF 25-160* tersebut juga memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 1. Spesifikasi Pompa

| No. | Spesifikasi unit pompa | Nilai dan Satuan |
|-----|------------------------|------------------|
| 1 | Flow | 1.66 L/s |
| 2 | Head | 30 m |
| 3 | n (kecepatan putaran) | 2.900 rpm |
| 4 | Power | 3 Kw |
| 5 | Voltage | 380 V |
| 6 | Frequency | 50 Hz |

2.2. Alat Vibration Analyzer

Deteksi getaran dilakukan menggunakan alat *vibration analyzer* tipe *FALCON* buatan *ACOEM*. Alat ini dilengkapi dengan sensor *akselerometer* digital internal, mampu merekam data vibrasi dalam bentuk *FFT*, *time waveform*, dan *envelope analysis*. *FALCON* memiliki rentang frekuensi pengukuran dari 10 Hz hingga 20 kHz, dan akurasi pengukuran hingga $\pm 1\%$. Pengukuran dilakukan dalam mode kecepatan (*velocity*), percepatan (*acceleration*), dan *displacement*, dengan hasil data dianalisis menggunakan *software* berbasis Wi-Fi terintegrasi untuk pemantauan kondisi mesin secara *real-time*



Gambar 2.2. Alat *Vibration analyzer* tipe *FALCON* buatan *ACOEM*.

Fitur Utama alat *vibration analyzer* tipe *FALCON*:

- Sensor *Triaksial* Terintegrasi : Dapat mengukur getaran pada tiga sumbu (X,Y,Z) secara bersamaan, sehingga mempercepat proses pengumpulan data.
- Layar sentuh : Dilengkapi dengan layar sentuh berukuran 7 inci yang mudah digunakan bahkan dengan sarung tangan kerja.
- Diagnostik Otomatis : Menggunakan *algoritma* cerdas untuk mendiagnosis berbagai kondisi mesin seperti ketidakseimbangan, *misalignment*, kerusakan bantalan, dan resonansi.
- Kompatibilitas dengan Perangkat Lunak : Terhubung dengan perangkat lunak *NEST* dan *Db@Work* untuk analisis lanjutan, pembuatan laporan, serta penyimpanan data historis.
- Konektivitas dan Penyimpanan : Mendukung Wi-Fi, USB, dan penyimpanan internal besar, memungkinkan transfer data yang cepat dan efisien.
- Fungsi Tambahan : Beberapa model *FALCON* juga dapat digunakan untuk *balancing in situ* dan *laser alignment*.

Berikut Langkah-langkah mendeteksi getaran pada pompa *sentrifugal* menggunakan alat *Vibration analyzer* tipe *FALCON* buatan *ACOEM* secara sistematis :

- Persiapan Alat : memastikan alat dalam kondisi terisi daya dan sensor *akselerometer* terhubung dengan baik.
- Pemasangan Sensor : Sensor *akselerometer* ditempelkan pada posisi horizontal, vertical, dan aksial pada pompa dan motor.
- Pengaturan Parameter pada *FALCON* : Setelah menyalakan alat, atur pengukuran dan parameter seperti RPM mesin (untuk analisis spektrum), jenis mesin (pompa,motor), frekuensi sampling (2x hingga 10x RPM)
- Pengambilan Data Getaran : Jalankan proses pengukuran getaran, alat akan otomatis merekam data dalam bentuk *Time waveform*, *FFT (Fast Fourier Transform)* spektrum, *Envelope* spektrum (khusus untuk *bearing fault*)
- Interpretasi Data dan Diagnosis : Membuka hasil spektrum frekuensi untuk melihat tanda tanda *Unbalance*, *misalignment*, kerusakan *bearing*, dan *kavitasi*.
- Tindak Lanjut : Berdasarkan dari analisis yang dilakukan, pompa *sentrifugal* mengalami kerusakan pada *bearing* dan *bearing housing* sehingga perlu mengganti dan memperbaiki komponen-komponen tersebut.

3. Analisa dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengukuran Getaran

Pengukuran dilakukan pada pompa *sentrifugal* dengan menggunakan alat *Vibration Analyzer* tipe *FALCON* buatan *ACOEM*. Pengambilan data dilakukan pada tiga arah (vertical, horizontal, aksial) di dua titik *bearing* utama, bearing depan (DE) dan bearing belakang (NDE). DE (*Drive End*) Titik ini berada di sisi motor penggerak , berada di lokasi dimana gaya putar dari motor di salurkan ke pompa, bearing di sisi DE sering mengalami beban tinggi karena torsi putaran. NDE (*Non Drive End*) Titik ini berada di sisi berlawanan dari penggerak, berada di ujung pompa dan ujung bebas dari motor, bearing di sisi NDE menahan beban radial dan menjaga poros tetap pada posisinya.



Gambar 3.0. Pompa Sentrifugal

Tabel 2. Hasil pengukuran sebelum diperbaiki

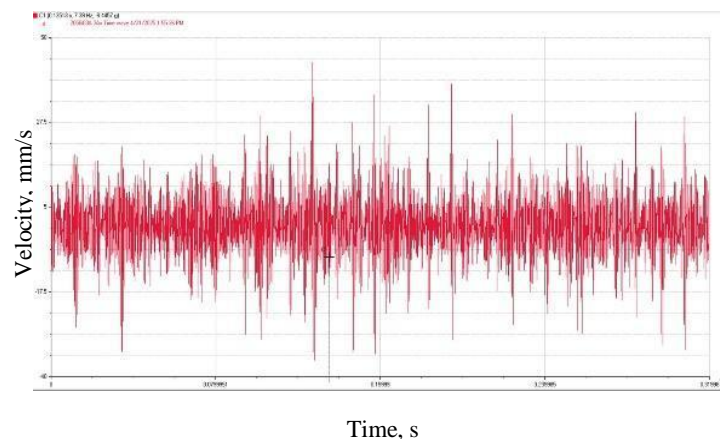
| Titik pengukuran | Va | Vx | Vy |
|------------------|------|------|------|
| Motor | | | |
| NDE | 3.37 | 2.61 | 3.23 |
| DE | 3.65 | 2.06 | 5.57 |
| Pompa | | | |
| NDE | 6.73 | 3.48 | 4.65 |
| DE | 7.06 | 4.22 | 3.33 |

Hasil pengukuran diukur melalui sensor dalam bentuk *accelerometer* (percepatan) dengan satuan m/s^2 sebagai sinyal analog, sinyal analog dari accelerometer diubah menjadi sinyal digital menggunakan Analog-to-Digital Converter (ADC) di dalam alat FALCON dan menggunakan frekuensi sampling tinggi agar bisa menangkap spektrum frekuensi yang luas. Proses ini dilakukan melalui Fast Fourier Transform (FFT) untuk konversi domain waktu ke domain frekuensi.

3.1.1. Penyajian Data

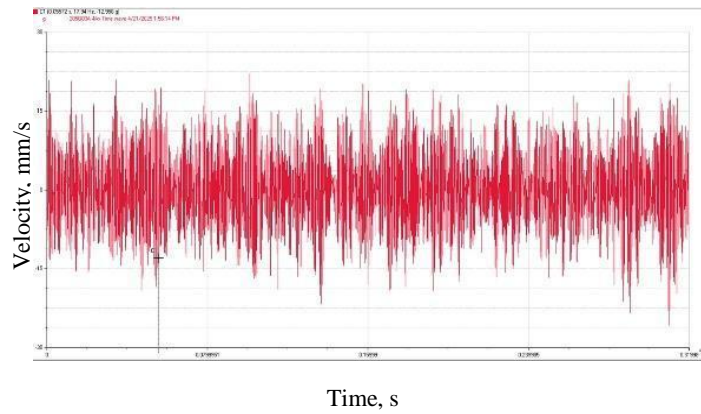
- Time Waveform (getaran domain waktu)

Pump DE (Drive End)



Gambar 3.1. domain waktu DE sebelum diperbaiki

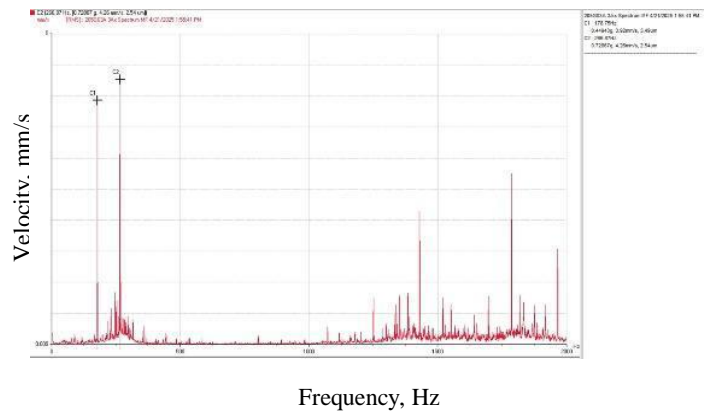
Pump NDE (Non Drive End)



Gambar 3.2. domain waktu NDE sebelum diperbaiki

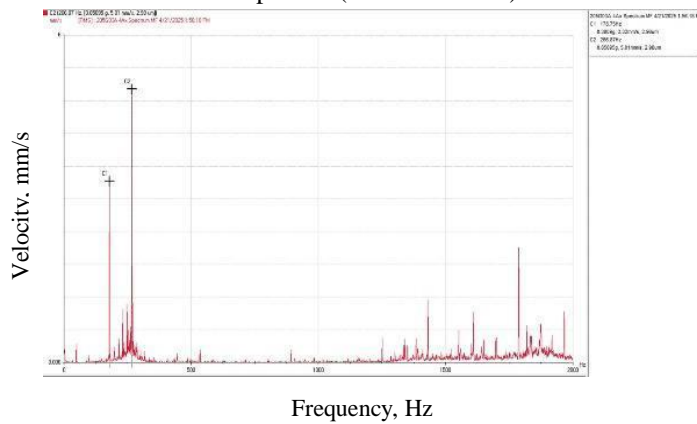
- Velocity spectrum (getaran domain frekuensi)

Pump DE (Drive End)



Gambar 3.3. Domain frekuensi DE sebelum diperbaiki

Pump NDE (Non Drive End)



Gambar 3.4. Domain frekuensi NDE sebelum diperbaiki

Dari data spektrum getaran, amplitude menunjukkan DE dan NDE :

C1 = 178.75 Hz

C2 = 266.87 Hz

3.2. Pembahasan

3.2.1. Analisa Spektrum Frekuensi

Untuk bearing NU305E, frekuensi kerusakan karakteristik seperti BPFI (Ball Pass Frequency Inner race), BPFO (Ball Pass Frequency Outer race), BSF (Ball Spin Frequency), dan FTF (Fundamental Train Frequency) tersedia dalam literatur teknis. Berdasarkan analisis FFT, terdapat komponen frekuensi yang konsisten dengan frekuensi karakteristik kerusakan *bearing 6206* (Pump DE) dan *NU305E* (Pump NDE), yang digunakan pada pompa *sentrifugal* dengan *brand KSB*, tipe *CPK-CMF 25-160* yang dianalisis getarannya. yaitu:

- **BPFO (Ball Pass Frequency Outer race):**
Muncul dominan pada *bearing* depan arah horizontal, menandakan adanya kerusakan pada *race* luar *bearing*.
- **BPFI (Ball Pass Frequency Inner race):**
Muncul di arah vertical, meskipun lebih lemah, mengindikasikan adanya kerusakan pada *race* dalam.
- **BSF (Ball Spin Frequency):**
Terjadi saat kerusakan berada pada elemen gelinding (*ball* atau *roller*).
- **FTF (Fundamental Train Frequency):**
Terjadi jika kerusakan terjadi pada kendang (*cage*) *bearing*.

1. Frekuensi karakteristik *bearing* DIN 6206 (Pump DE)

- **Diketahui :**

Tabel 3. Karakteristik *Bearing* DIN 6206

| | |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| Jumlah bola (n) | 9 |
| Diameter bola (d) | 7,94 mm |
| Pitch diameter (D _p) | 39 mm |
| Sudut kontak (β) | 0° (sehingga cos(β) = 1) |
| Kecepatan poros (f _r) | 2900 RPM = 2900/60 = 48.33 Hz |

- **Rumus Frekuensi Karakteristik:**

Tabel 4. Rumus frekuensi *bearing* DIN 6206

| | |
|------|------------------------------------------------------------------------|
| BPFO | $(n/2) \times f_r \times (1 - (d / D_p) \times \cos(\beta))$ |
| BPFI | $(n/2) \times f_r \times (1 + (d / D_p) \times \cos(\beta))$ |
| BSF | $(D_p / d) \times (1 - ((d / D_p) \times \cos(\beta))) \times f_r / 2$ |
| FTF | $0.5 \times (1 - (d/D_p) \times \cos(\beta)) \times f_r$ |

- **Hitungan**

$$(1) \text{BPFO} = \frac{9}{2} \times 48.33 \times (1 - 0.2036) \approx 4.5 \times 48.33 \times 0.7964 \approx 172.85 \text{ Hz} \quad (1)$$

$$(2) \text{BPFI} = \frac{9}{2} \times 48.33 \times (1 + 0.2036) \approx 4.5 \times (1 + 0.2036) \times 48.33 \times 1.2036 \approx 262.06 \text{ Hz}$$

$$(3) \text{BSF} = \frac{39}{7.94} \times (1 - (0.2036)^2) \times \frac{48.33}{2} \approx 4.91 \times (1 - 0.0414) \times 24.165 \approx 4.91 \times 0.9586 \times 24.165 \approx 113.71 \text{ Hz}$$

$$(4) \text{FTF} = 0.5 \times (1 - 0.2036) \times 48.33 \approx 0.5 \times 0.7964 \times 48.33 \approx 19.23 \text{ H}$$

- **Frekuensi Kerusakan *Bearing* 6206 pada 2900 RPM**

Tabel 5. Frekuensi Kerusakan *Bearing* 6206

| Jenis Frekuensi | Nilai (Hz) |
|-----------------|------------|
| BPFO | 172.85 Hz |
| BPFI | 262.06 Hz |
| BSF | 113.71 Hz |
| FTF | 19.23 Hz |

Hasil pengukuran getaran pompa, *bearing* DIN 6206 pada titik DE menunjukkan nilai frekuensi C1 = 178.75 Hz dan C2 = 266.87 Hz, yang masuk ke dalam jenis frekuensi BPFO dan BPFI, mengindikasikan bahwa *bearing* mengalami kerusakan pada *race* luar dan *race* dalam *bearing*. Hasil tersebut konsisten dengan definisi frekuensi karakteristik *bearing* seperti BPFO dan BPFI, dimana BPFO terkait dengan passing ball pada outer *race*, sementara BPFI muncul akibat passing ball pada inner *race*.

2. Frekuensi karakteristik *bearing* NU305E (Pump NDE)

- **Diketahui:**

Tabel 6. Karakteristik *Bearing* NU305E

| | |
|----------------------------------|-------------------------------|
| Jumlah roller (n) | 12 |
| Diameter roller (d) | 6.5 mm |
| Pitch diameter (D _p) | 39 mm |
| Sudut kontak (β) | 0° (sehingga cos(β) = 1) |
| Kecepatan rotasi | 2900 RPM = 2900/60 = 48.33 Hz |

- **Rumus Frekuensi Karakteristik**

Tabel 7. Rumus Frekuensi *bearing* NU305E

| | |
|------|------------------------------------------------------------------------|
| BPFO | $(n/2) \times f_r \times (1 - (d / D_p) \times \cos(\beta))$ |
| BPFI | $(n/2) \times f_r \times (1 + (d / D_p) \times \cos(\beta))$ |
| BSF | $(D_p / d) \times (1 - ((d / D_p) \times \cos(\beta))) \times f_r / 2$ |
| FTF | $0.5 \times (1 - (d/D_p) \times \cos(\beta)) \times f_r$ |

- **Hitungan**

$$(1) \text{BPFO} = \frac{12}{2} \times 48.33 \times (1 - 0.1667) = 6 \times 48.33 \times 0.8333 \approx 241.4 \text{ Hz} \quad (2)$$

$$(2) \text{BPFI} = \frac{12}{2} \times 48.33 \times (1 + 0.1667) = 6 \times 48.33 \times 1.1667 \approx 338.0 \text{ Hz}$$

$$(3) \text{BSF} = \frac{39}{6.5} \times (1 - (0.1667)^2) \times \frac{48.33}{2} = 6 \times (1 - 0.0278) \times 24.165 = 6 \times 0.9722 \times 24.165 \approx 141.0 \text{ Hz}$$

$$(4) \text{FTF} = 0.5 \times (1 - 0.1667) \times 48.33 = 0.5 \times 0.8333 \times 48.33 \approx 20.13 \text{ Hz}$$

- **Frekuensi Kerusakan *Bearing* NU305E pada 2900 RPM**

Tabel 8. Frekuensi Kerusakan bearing NU305E

| Jenis Frekuensi | Nilai (Hz) |
|-----------------|------------|
| BPFO | 241.4 Hz |
| BPFI | 338.0 Hz |
| BSF | 141.0 Hz |
| FTF | 20.13 Hz |

Hasil pengukuran getaran pompa, bearing NU305E pada titik NDE menunjukkan nilai frekuensi C1 = 178.75 Hz dan C2 = 266.87 Hz, yang masuk kedalam jenis frekuensi BSF dan BPFO, mengindikasikan bahwa bearing mengalami kerusakan pada elemen gelinding dan race luar bearing. Frekuensi BSF biasanya terkait dengan rotasi elemen bergulir (elemen gelinding) di dalam bearing, sementara BPFO menunjukkan passing ball melintasi race luar bearing—perpaduan puncak frekuensi tersebut dalam spektrum FFT memberikan bukti kuat adanya kerusakan mekanis pada dua komponen penting bearing: bola dan race luar.

3.2.2. Interpretasi Menurut ISO 10816-7

Standar ISO 10816-7 merupakan acuan internasional untuk evaluasi getaran mesin berputar dalam kondisi operasional, termasuk pompa sentrifugal. Standar ini sangat penting digunakan dalam analisis getaran karena memberikan batas-batas getaran yang dapat diterima untuk memastikan keandalan dan keselamatan peralatan. Berikut ini adalah tabel evaluasi tingkat getaran berdasarkan ISO 10816-7 untuk pompa sentrifugal berdasarkan velocity RMS (mm/s), sesuai kategori umum dari standar tersebut,

Tabel 9. Standar getaran ISO 10816-7

| DIN ISO 10816-7 | Category 1 | | Category 2 | | |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------|
| Pump type | Pumps with high reliability, availability or security requirements. | | Pumps for general or less critical applications. | | r < 600 rpm |
| Power | < 200 kW | > 200 kW | < 200 kW | > 200 kW | 0.5 rpm 1.0 rpm 2.0 rpm |
| Velocity v_{eff} | 7,6 | | 9,5 | | Displacement s_{rms} 130 80 50 μm |
| 10–1000 Hz $n > 600$ rpm | 6,5 | | 8,5 | | |
| | 5,0 | | 6,1 | | |
| 2–1000 Hz $n < 600$ rpm | 4,0 | | 5,1 | | |
| | 3,5 | | 4,2 | | |
| | 2,5 | | 3,2 | | |
| | mm/s rms | | mm/s rms | | |

A Newly commissioned machines

B Unrestricted long term operation

C Restricted long term operation

D Vibration causing damage

Berdasarkan dari standar ISO 10816-7 untuk pompa rotari, nilai velocity RMS > 4.0 mm/s pada bearing menunjukkan kondisi berada dalam zona C dan nilai velocity RMS > 6.5 mm/s menunjukkan kondisi berada dalam zona D. Tindakan penggantian bearing sangat direkomendasikan untuk menghindari kerusakan total pada pompa sentrifugal tersebut.

3.2.3. Evaluasi Kondisi dan Rekomendasi

Analisis dilakukan secara otomatis oleh fitur diagnosis built-in dan dikonfirmasi secara manual melalui data FFT, sehingga berhasil mendeteksi frekuensi spesifik kerusakan komponen pada pompa sentrifugal berupa bearing depan (DE) dan bearing belakang (NDE) pada pompa, serta menimbulkan kelonggaran pada rumah bearing pada saat pompa dibuka. Direkomendasikan pergantian pada bearing (DE) depan dan belakang (NDE), serta perlu melakukan bushing pada rumah bearing untuk mengembalikan ukuran diameter semula. Melakukan alignment ulang setelah penggantian bearing dan perbaikan pada rumah bearing untuk mencegah kerusakan berulang. Berikut adalah gambar bearing dan rumah bearing yang akan di bushing :

Bearing dan Rumah bearing pompa sentrifugal Brand KSB



Gambar 3.6. *Bearing dan Rumah bearing pompa sentrifugal*

3.2.4. Hasil Pengukuran Ulang Setelah Perbaikan

Setelah dilakukan tindakan perbaikan berupa penggantian *bearing* dan melakukan bushing pada rumah *bearing*, serta penyetelan alignment pada unit pompa, pengukuran ulang perlu dilakukan untuk membandingkan kondisi mesin sebelum dan sesudah, serta menentukan apakah pompa sudah aman untuk dioperasikan kembali. Dengan demikian, pengukuran ulang tidak hanya berguna untuk validasi perbaikan, tetapi juga merupakan langkah preventif yang penting untuk mendeteksi dini potensi kegagalan, menjaga keandalan pompa, dan memperpanjang umur operasional sistem.

1. Hasil Data *Velocity* (mm/s) setelah perbaikan

Pengukuran ulang pasca perbaikan menunjukkan bahwa nilai *velocity* telah menurun < 1.35 mm/s, jauh dibawah ambang batas kerusakan menurut standar ISO 10816-7. Tidak di temukan lagi sinyal getaran pada frekuensi karakteristik kerusakan bearing. Mesin saat ini berada dalam kondisi normal dan aman untuk beroperasi. Berikut adalah tabel hasil pengukuran ulang pada pompa *sentrifugal* menggunakan alat *Vibration analyzer*:

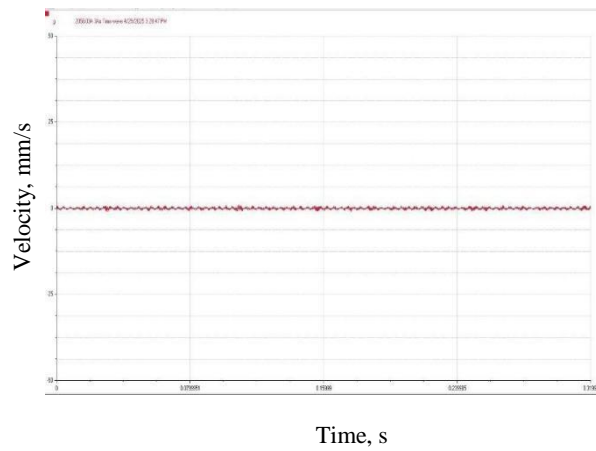
Tabel 10. Hasil pengukuran setelah diperbaiki

| Titik pengukuran | Va | Vx | Vy |
|------------------|------|------|------|
| Motor | | | |
| NDE | 1.08 | 1.35 | 1.01 |
| DE | 0.98 | 1.03 | 1.30 |
| Pompa | | | |
| NDE | 1.28 | 1.14 | 0.84 |
| DE | 1.06 | 0.72 | 0.47 |

2. Hasil Data *Time Waveform* (domain waktu) Setelah Perbaikan

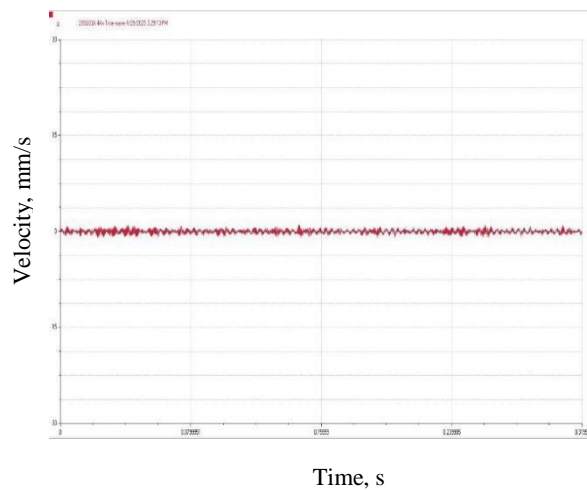
Setelah perbaikan dilakukan termasuk penggantian bearing, penyetelan alignment, dan pemasangan bushing data *time waveform* diambil kembali untuk mengevaluasi perubahan perilaku getaran secara langsung. Analisis domain waktu ini penting karena sinyal mentahnya (amplitudo terhadap waktu) memungkinkan identifikasi peristiwa dinamis seperti benturan (impacts), modulasi amplitudo, dan sinyal non-linier lainnya yang mungkin belum muncul secara jelas dalam spektrum frekuensi. Pengukuran pasca-perbaikan harus menunjukkan sinyal yang lebih halus. Berikut hasil data *time waveform* setelah perbaikan;

Pump DE (Drive End)



Gambar 3.7. Domain waktu DE setelah diperbaiki

Pump NDE (Non Drive End)

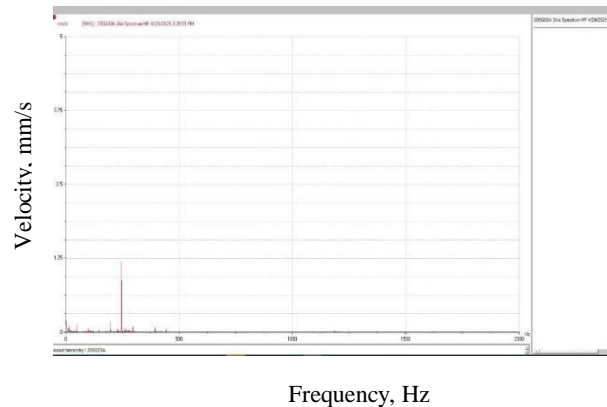


Gambar 3.8. Doimain waktu NDE setelah diperbaiki

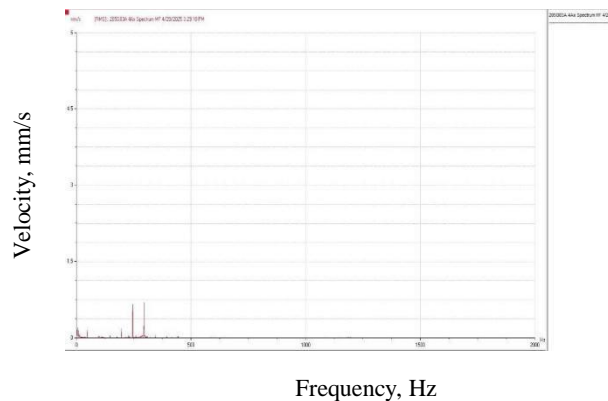
Hasil perbandingan domain waktu, sebelum perbaikan sinyal menunjukkan pola *impact* berulang dengan puncak amplitudo yang tidak stabil. Menandakan adanya kerusakan pada komponen pompa. Setelah perbaikan sinyal gelombang berubah menjadi halus dan simetris, menunjukkan rotasi mesin yang lebih stabil, yang berarti beban bekerja merata dan tidak ada kerusakan mekanis aktif.

Perubahan ini sangat penting dalam analisis domain waktu. Sinyal time waveform yang menampilkan *impact* berulang dengan peak amplitudo yang fluktuatif umumnya menunjukkan adanya benturan internal—seperti akibat kerusakan pada bearing, komponen longgar, atau kerusakan lainnya. Sebaliknya, bentuk sinyal yang halus dan simetris pasca-perbaikan menandakan bahwa impuls tersebut telah hilang dan sistem beroperasi dengan stabil, termasuk distribusi beban yang merata dan tidak adanya gangguan mekanis seperti misalignment atau kelonggaran hal ini konsisten dengan prinsip dasar analisis bentuk gelombang pada diagnosis mesin.

3. Hasil Data Spektrum (domain frekuensi) Setelah Perbaikan



Gambar 3.9. Domain frekuensi DE setelah diperbaiki
Pump NDE (Non Drive End)



Gambar 3.10. Domain frekuensi NDE setelah diperbaiki

Hasil perbandingan domain frekuensi, sebelum perbaikan terdapat puncak signifikan pada frekuensi 178.75 Hz dan 266.87 Hz yang menunjukkan kerusakan pada BPFO dan BPFI untuk *bearing* depan (DE), serta kerusakan pada BSF dan BPFO untuk *bearing* belakang (NDE). Setelah perbaikan spektrum menunjukkan hilangnya puncak pada frekuensi BPFO, BPFI, dan BSF. Hanya frekuensi dasar rotasi (48.3 Hz) dan harmonik yang normal yang tampak, nilai RMS turun menjadi < 1.35 mm/s, berada di zona A.

4. Kesimpulan

Secara keseluruhan, metode yang digunakan untuk mengidentifikasi kerusakan pada pompa menggunakan alat *vibration analyzer*, alat ini mengukur getaran pompa pada titik tertentu dalam bentuk *accelerometer* (percepatan) yang dirubah menjadi bentuk *velocity* (kecepatan) yang berbentuk domain waktu lalu di transformasi dalam bentuk domain *frequency* untuk mengetahui kerusakan komponen pompa *sentrifugal* yang dapat dilihat dari diagram frekuensi.

Setelah dilakukan perbaikan pada *bearing*, pengukuran ulang menunjukkan bahwa nilai getaran kembali ke ambang batas normal (berdasarkan standar ISO 10816-7). Frekuensi gangguan sebesar 266.87 Hz tidak lagi muncul pada spektrum frekuensi, dan sinyal domain waktu menunjukkan kondisi kerja yang lebih stabil. Metode analisis getaran terbukti efektif dalam mendeteksi kondisi teknis pompa *sentrifugal*. Melalui pemantauan getaran, dapat diidentifikasi gejala awal kerusakan komponen mekanis, khususnya pada sistem *bearing*.

Penggunaan alat *Vibration analyzer* memberikan kemudahan dalam proses diagnosis, dengan fitur analisis spektrum (FFT), pengukuran 3 arah simultan, dan tampilan tren getaran secara *real time*, sehingga sangat mendukung proses pemeliharaan prediktif. Secara keseluruhan, penerapan metode analisis getaran sebagai bagian dari pemeliharaan prediktif pada pompa *sentrifugal* sangat disarankan, karena mampu mendeteksi potensi kerusakan sejak dini dan mencegah terjadinya kegagalan mesin secara tiba-tiba (*breakdown*).

Dalam penelitian ini, analisis pada pompa sentrifugal dilakukan setiap bulan pada saat kondisi tertentu, penelitian ini bisa mendeteksi awal gejala kerusakan pada komponen pompa dengan sensor accelerometer, yang mengukur percepatan lalu di ubah dalam bentuk velocity (kecepatan) dan di transformasi ke domain frekuensi yang disebut dengan FFT untuk mengetahui kerusakan pada pompa sentrifugal.

Disarankan agar penelitian selanjutnya dilengkapi dengan implementasi sistem monitoring getaran secara real-time menggunakan sensor accelerometer permanen yang dipasang di housing bantalan pada arah radial dan aksial. Data RMS atau getaran velocity yang diperoleh kemudian ditrack secara terus-menerus, dan dihubungkan dengan ambang batas alarm berdasarkan *zone B, C, D* sebagaimana diatur dalam ISO 10816-7. Pendekatan ini memungkinkan deteksi awal kegagalan mekanis seperti bantalan aus, imbalance, atau misalignment tanpa menunggu kerusakan aktual terjadi, karena alarm bisa otomatis dipicu saat amplitude melebihi $1,25\times$ batas zona C (zone D) sesuai rekomendasi standar internasional.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Akhmad Danung Yudistira, Ridwan Al Alif & Syafrizal Syarief (2023). Model alat uji kerusakan pada pompa sentrifugal menggunakan sensor accelerometer untuk predictive maintenance.
- [2] Berkah Fajar TK & Ahmad Widodo (2020). Cavitation Detection Of Centrifugal Pump Using Vibration Signature Analysis.
- [3] Latuny, J. (2013). *A sensitivity comparison of Neuro-fuzzy feature extraction methods from bearing failure signals* (Doctoral dissertation, Curtin University).
- [4] Adistya, I. S. (2014). Pengembangan sistem monitoring vibrasi pada kipas pendingin menggunakan accelerometer ADXL345 dengan metode FFT berbasis labview.
- [5] Thuy Chu (2024). A review of vibration analysis and its applications
- [6] M. Syahrudin & Erwen Martianis (2024). Analisa getaran pada pompa sentrifugal untuk penerapan total productive maintenance (TPM) di PDAM tirta terubuk bengkalis
- [7] Masound Hatami Garousi (2024). Vibration analysis of a Centrifugal Pump with Healthy and Defective Impellers and Fault Detection Using Multi-Layer Perceptron.
- [8] Anitya Ari I (2013). Deteksi kerusakan impeler pompa sentrifugal dengan analisa sinyal getaran
- [9] Aji, K. (2007). Deteksi kerusakan bantalan gelinding pada pompa sentrifugal dengan analisa sinyal getaran.
- [10] Manikandan S & Duraivelu K (2023). VIBRATION BASED PREDICTIVE FAULT ANALYSIS OF BEARING SEAL FAILURE AND CAVITATION ON INDUSTRIAL MONOBLOCK CENTRIFUGAL PUMP USING DEEP LEARNING ALGORITHM.
- [11] D. Siano & M.A. Panza (2018). Diagnostic method by using vibration analysis for pump fault detection
- [12] Hermawan Novianto & Sujono (2023). Vibration analysis of fire pump of PEM AKAMIGAS CEPU: A CASE STUDY