

Pengaruh Putaran Poros pada Pompa Sentrifugal yang Disusun Paralel terhadap Karakteristik Vibrasi

Tambos August Sianturi¹⁾, Winfrontstein Naibaho^{2,a)}, Radison Siallagan³⁾ dan Keren Pardede⁴⁾

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Mesin UHKBNP ,
Jl. Sangnawaluh No.4, Pematangsiantar-Pematangsiantar, Indonesia,21136

^{a)} winnaibaho@gmail.com (corresponding author),

Abstrak

Pompa merupakan alat yang digunakan untuk mempercepat aliran fluida ketempat yang diperlukan. Pengaruh putaran pada pompa sangat mempengaruhi kecepatan laju aliran menghantarkan fluida tersebut ataupun melakukan daya hisap (suction). Metode penelitian ini dilakukan dengan memvariasi kecepatan putar pada pompa untuk mengetahui getaran yang terjadi akibat variasi putaran tersebut dari sisi arah horizontal dan vertical. Hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa hasil yang merupakan jawaban dari tujuan penelitian ini. Hasil penelitian yang dilaksanakan dapat disimpulkan bahwa kedua posisi pengukuran diatas dapat disimpulkan bahwa hasil respon getaran maksimum yang paling rendah terdapat pada pompa di titik P-04 pada $n = 500$ RPM dengan harga simpangan $0,75 \times 10^{-6}$ m arah horizontal sedangkan yang paling tinggi terdapat pada pompa dititik P-01 pada $n = 500$ RPM dengan harga simpangan $1,85 \times 10^{-6}$ m arah horizontal. Dari hasil pengukuran respon getaran yang diukur pada pompa, elektromotor, landasan dapat disimpulkan bahwa simpangan terbesar terjadi pada pompa di titik P-01 dengan harga simpangan $1,85 \times 10^{-6}$ m arah horizontal, diikuti elektromotor di titik P-05 dengan harga simpangan $1,77 \times 10^{-6}$ m arah vertikal kemudian landasan di titik P-06 dengan harga simpangan $1,66 \times 10^{-6}$ m arah vertikal. Dari standart ISO 10816-3 untuk velocity pada pompa dengan harga tertinggi vertikal $4,56$ m/s di titik P-05 dikategorikan pada zona C berwarna kuning, getaran dari mesin dalam batas toleransi dan hanya dioperasikan dalam waktu terbatas, untuk arah horizontal harga tertinggi $4,37$ m/s dititik P-02 dikategorikan pada zona B berwarna hijau muda, getaran dari mesin baik dan dapat dioperasikan tanpa larangan.

Kata kunci: getaran, pompa sentrifugal, variasi putaran

Abstract

The pump is a tool used to accelerate the flow of fluid to where it is needed. The influence of rotation on the pump greatly affects the speed of the flow rate delivering the fluid or carrying out the suction power. This research method is carried out by varying the rotational speed of the pump to determine the vibrations that occur due to variations in rotation from the horizontal and vertical directions. The results of the research that has been carried out, obtained several results which are the answer to the purpose of this study. The results of the research carried out can be concluded as follows: From the two measurement positions above it can be concluded that the lowest maximum vibration response results are found at the pump at point P-04 at $n = 500$ RPM with a deviation of 0.75×10^{-6} m horizontally while the highest is found at the pump at point P-01 at $n = 500$ RPM with a deviation of 1.85×10^{-6} m in the horizontal direction. at point P-01 with a deviation of 1.85×10^{-6} m in the horizontal direction, followed by an electromotor at point P-05 with a deviation of 1.77×10^{-6} m in the vertical direction then the base at point P-06 with a deviation of $1,66 \times 10^{-6}$ m vertical direction. From the ISO 10816-3 standard for the velocity of the pump with the highest vertical price of 4.56 m/s at point P-05 it is categorized in zone C in yellow, the vibration of the engine is within tolerance limits and is only operated for a limited time, for the horizontal direction the highest price 4.37 m/s at point P-02 is categorized in zone B which is light green in color, the vibration of the machine is good and can be operated without restrictions.

Keywords: centrifugal pump, rotation variation, vibration.

I. PENDAHULUAN

Salah satu jenis pompa yang sangat banyak dipakai oleh dunia industri terutama industri pengolahan dan pendistribusian air adalah pompa sentrifugal. Keunggulan pompa sentrifugal yaitu:

- Konstruksinya sederhana
- Mudah pemasangannya.
- Perawatan, kapasitas dan *head* yang tinggi.
- Harga relatif murah, tetapi kehandalannya cukup tinggi.

Walaupun banyak terdapat kelebihan dan kehandalan dari pompa sentrifugal ini tetapi masih sering dijumpai kegagalan pengoperasian yang terjadi dilapangan yang hampir mencapai 80%, hal ini terutama terjadi pada sambungan-sambungan pipa yang disebabkan oleh kesalahan waktu pemasangan dan pengoperasian, seperti penyetulan sambungan pada pompa dan motor, pondasi pompa, penggunaan bentuk maupun bahan rangka pompa, kavitasi, serta getaran. Getaran adalah salah satu masalah yang paling sering terjadi pada mesin pompa. Pompa merupakan alat yang digunakan untuk membantu proses mengalirnya fluida, dengan menggunakan variasi putaran akan dapat diketahui kecepatan berapa yang aman dioperasikan agar tidak melebihi standar getaran yang diizinkan.

Beberapa kelemahan lainnya adalah kesalahan perencanaan yang mengakibatkan timbulnya getaran yang tinggi pada pengoperasian pompa. Disamping pengoperasian, pemberhentian pompa juga memberikan getaran yang sangat besar pada pompa, dimana pompa dioperasikan dalam kondisi katup tertutup. Disamping beberapa keunggulan serta kelemahan pengoperasian dan pemilihan pompa sentrifugal, masih diperlukan penelitian yang lebih dalam tentang pengoperasian yang terbaik dari segi head dan kapasitas maupun putaran poros sehingga pompa beroperasi dalam keadaan getaran yang rendah dan getaran itu dapat menjadi indikator kerja dari pompa. Pengujian dan penyelidikan terhadap getaran pada pompa telah dilakukan oleh beberapa peneliti dan balai pengujian dengan mengkaji beberapa aspek yang berbeda. Sehubungan dengan majunya teknik perawatan peralatan mesin yang ditandai dengan digunakannya teknik perawatan predictive maintenance yang berdasarkan kepada perhitungan kondisi mesin ketika beroperasi. Teknik ini bergantung kepada kenyataan bahwa sebahagian besar mesin akan memberikan peringatan sebelum terjadi kerusakan atau kegagalan. Beberapa gejala kegagalan pada mesin tersebut dapat dirasakan dari beberapa analisis seperti analisis vibrasi, analisis temperatur serta analisis keausan peralatan.

II. LANDASAN TEORI

Kebisingan bisa menjadi masalah yang signifikan dan mengganggu. Getaran berlebihan dari peralatan utama dapat ditransmisikan langsung ke struktur bangunan, yang menyebabkan tingkat getaran struktural yang tidak nyaman (dan terkadang berbahaya). Vibrasi adalah salah satu indikator yang baik untuk menentukan apakah suatu peralatan yang beroperasi dalam keadaan baik. Semakin kecil nilai suatu vibrasi maka akan menjadi semakin baiklah peralatan itu, dan sebaliknya apabila suatu peralatan yang beroperasi mempunyai getaran yang besar atau tinggi, maka kondisi peralatan tersebut cukup rawan. Oleh karena itu suatu peralatan yang beroperasi sebaiknya memiliki suatu nilai getaran standart dan batasan getaran yang diperbolehkan sesuai dengan standar dari pabrik pembuatnya, sehingga apabila nilai getaran yang terjadi diluar batasan yang diizinkan maka peralatan tersebut harus menjalani tindakan perawatan (*maintenance*).

A. Gerak Harmonik

Gerak osilasi dapat berulang secara teratur, jika gerak itu berulang dalam selang waktu yang sama, maka geraknya disebut dengan gerak periodik. Sedangkan waktu pengulangannya disebut dengan periode osilasi dan kebalikannya yaitu $f = 1/\tau$ disebut frekwensi. Jika gerak dinyatakan dalam fungsi waktu $x(t)$, maka setiap gerak periodik harus memenuhi hubungan $(t) = x(1 + \tau)$. Secara umum gerak harmonik dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$X = A \sin 2\pi t / \tau \dots\dots\dots (2.1)$$

keterangan:

- A = amplitudo osilasi yang diukur dari posisi setimbang massa.
- τ = priode dimana gerak diulang pada $t = \tau$.

Gerak harmonik sering dinyatakan sebagai proyeksi suatu titik yang bergerak melingkar dengan kecepatan yang tetap pada suatu garis lurus seperti terlihat pada gambar 2.1 dengan kecepatan sudut garis OP sebesar ω , maka perpindahan simpangan x dapat dituliskan sebagai

$$x = A \sin \omega t \dots\dots\dots (2.2)$$

Besarnya ω biasanya diukur dalam radian per detik dan disebut frekuensi lingkaran. Oleh karena itu gerak berulang dalam 2π radian, maka didapat hubungan:

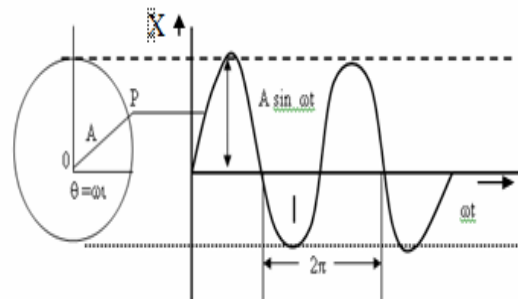
$$\omega = 2\pi / \tau = 2\pi \cdot f \dots\dots\dots (2.3)$$

dengan τ dan f adalah periode dan frekwensi gerak harmonik berturut turut dan biasanya diukur dalam detik dan siklus perdetik.

Kecepatan dan percepatan gerak harmonik dapat diperoleh dengan mudah baik secara diferensiasi simpangan gerak harmonik. Dengan menggunakan notasi titik untuk turunannya, maka didapat:

$$\dot{x} = \omega A \cos \omega t = \omega A \sin (\omega t + \pi/2) \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 A \sin \omega t = \omega^2 A \sin (\omega t + \pi) \dots\dots\dots (2.5)$$



Gambar 1. Gerak harmonik sebagai proyeksi suatu titik yang bergerak pada lingkaran

Perhitungan getaran dapat dinyatakan dengan persamaan berdasarkan simpangan arah vertikal:

$$y = A \cdot \sin \omega t$$

$$A = \frac{y}{\sin \omega t} \quad (2.6)$$

dengan kecepatan:

$$\dot{y} = \omega A \cos \omega t$$

$$A = \frac{\dot{y}}{\omega \cos \omega t} \quad (2.7)$$

dan percepatan:

$$\ddot{y} = -\omega^2 A \sin \omega t$$

$$A = \frac{\ddot{y}}{-\omega^2 \sin \omega t} \quad (2.8)$$

substitusi persamaan 2.6 ke persamaan 2.8 akan didapat:

$$\ddot{y} = -y \omega^2 \quad (2.9)$$

Tanda negatif menyatakan bahwa arah percepatan berlawanan dengan arah simpangannya. Sehingga didapat frekuensi dalam bentuk kecepatan sudut:

$$\omega = -\sqrt{\frac{\ddot{y}}{y}} \quad (2.10)$$

A yang merupakan simpangan maksimum mempunyai nilai yang sama pada simpangan (*displacement*), kecepatan (*velocity*), dan percepatan (*acceleration*), sehingga berlaku hubungan:

$$A_1 = A_2 = A_3 \quad (2.11)$$

dimana selanjutnya diperoleh:

$$\frac{y}{\sin \omega t} = \frac{\dot{y}}{\omega \cos \omega t} = \frac{\ddot{y}}{\omega^2 \sin \omega t}$$

sehingga:

$$\frac{\dot{y}}{y} = \frac{\sin \omega t}{\omega \cos \omega t}$$

maka:

$$\omega t = \arctan \frac{y \omega}{\dot{y}}$$

Simpangan arah horizontal, $x = A \cdot \sin \omega t$

$$A = \frac{x}{\sin \omega t} \quad (2.12)$$

dengan kecepatan, $\dot{x} = \omega A \cos \omega t$

$$A = \frac{\dot{x}}{\omega \cos \omega t} \quad (2.13)$$

dan percepatan, $\ddot{x} = -\omega^2 A \sin \omega t$

$$A = \frac{\ddot{x}}{-\omega^2 \sin \omega t} \quad (2.14)$$

substitusi persamaan 2.12 ke persamaan 2.14 akan diperoleh:

$$\ddot{x} = -x \omega^2 \quad (2.15)$$

Tanda negatif menyatakan bahwa arah percepatan berlawanan dengan arah simpangannya. Sehingga didapat frekuensi dalam bentuk kecepatan sudut:

$$\omega = -\sqrt{\frac{\ddot{x}}{x}} \quad (2.16)$$

A sebagai harga simpangan maksimum mempunyai harga yang sama pada simpangan (*displacement*), kecepatan (*velocity*), dan percepatan (*acceleration*), sehingga berlaku hubungan:

$$A_1 = A_2 = A_3 \quad (2.17)$$

sehingga didapat:

$$\frac{x}{\sin \omega t} = \frac{\dot{x}}{\omega \cos \omega t} = \frac{\ddot{x}}{\omega^2 \sin \omega t}$$

dimana:

$$\frac{\dot{x}}{x} = \frac{\sin \omega t}{\omega \cos \omega t}$$

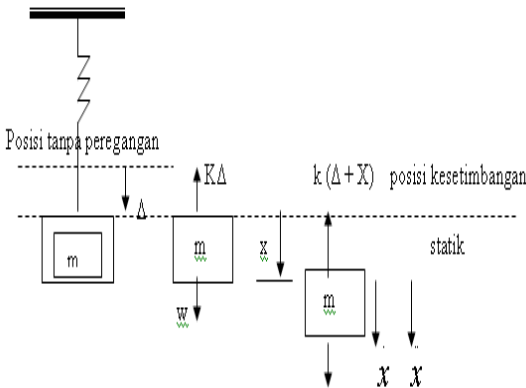
maka:

$$\omega t = \arctan \frac{x \omega}{\dot{x}}$$

B. Getaran Bebas (Free Vibration)

Getaran bebas terjadi jika sistem berosilasi karena bekerjanya gaya yang ada dalam sistem itu sendiri (*inherent*) dan apabila tidak ada gaya luar yang bekerja. Sistem yang bergetar bebas akan bergetar pada satu atau lebih frekwensi naturalnya yang merupakan sifat

dinamika yang dibentuk oleh distribusi massa dan kekakuannya.



Gambar 2. Sistem pegas-massa dari diagram benda bebas

Hukum Newton kedua adalah dasar pertama untuk meneliti gerak system, pada gambar 2 terlihat perubahan bentuk pegas pada posisi kesetimbangan adalah Δ dan gaya pegas adalah $k\Delta$ yang sama dengan gaya gravitasi yang bekerja pada massa m.

$$k\Delta = w = mg \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

Hukum Newton kedua untuk gerak diterapkan pada massa m:

$$m \ddot{x} = \Sigma F = w - k(\Delta + x) \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

dan karena $k\Delta = w$, maka diperoleh:

$$m \ddot{x} = -kx \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

Frekuensi lingkaran $\omega_n^2 = k/m$, sehingga persamaan (2.8) dapat ditulis:

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad \dots\dots\dots(2.21)$$

sehingga persamaan umum persamaan differensial linier orde kedua yang homogen:

$$X = A \sin \omega_n t + \beta \cos \omega_n t \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

Periode natural osilasi dibentuk dari $\omega_n \tau = 2\pi$ atau

$$\tau = 2\pi \sqrt{m/k} \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

dan frekuensi natural adalah:

$$f_n = 1/\tau = 1/2 \pi \sqrt{k/m} \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

keterangan:

m = massa (kg)

F = gaya (N)

w = berat (N)

x = vektor simpangan arah x (m)

\ddot{x} = vektor percepatan arah x (m/det²)

τ = periode osilasi (det)

ω_n = frekuensi pribadi tak teredam (rad/det)

f_n = frekuensi natural (Hz)

C. Getaran Paksa (Forced Vibration)

Getaran yang terjadi karena rangsangan gaya luar disebut getaran paksa. Eksitasi ini biasanya dihasilkan oleh ketidak seimbangan pada mesin-mesin yang berputar. Selanjutnya terdapat persamaan-persamaan dalam besaran-besaran sebagai berikut:

$$\omega_n = \sqrt{k/m} = \text{frekuensi osilasi tanpa redaman.}$$

$$C_c = 2 m \omega_n = \text{redaman kritis.}$$

$$\zeta = C/C_e = \text{faktor redaman.}$$

$$C\omega/k = C/C_e = C_e \omega/k = 2 \zeta = \frac{\omega}{\omega_n}$$

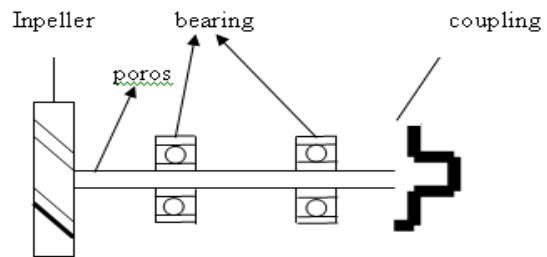
Jadi persamaan amplitudo dan fasa yang non dimensional akan menjadi:

$$\frac{Xk}{F_0} = 1 / \sqrt{(1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2)^2 + (2\zeta(\frac{\omega}{\omega_n}))^2} \quad \dots\dots(2.31)$$

dimana, $\tan \varphi = \frac{2\zeta(\omega / \omega_n)}{1 - (\omega / \omega_n)^2}$

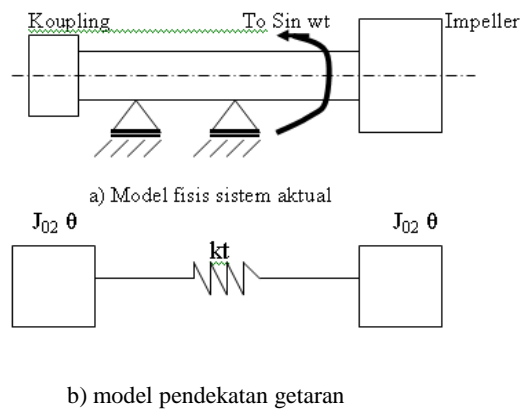
C. Landasan Teori Pengujian Getaran Mesin

Getaran yang timbul dari pompa dikarenakan oleh putaran motor melalui *coupling* dan *impeller* sehingga dapat dianalisis sesuai dengan gerak yang timbul.



Gambar 3. Mekanisme gerak

Dalam kondisi ini dapat diasumsikan bahwa akan terjadi torsi yang dihasilkan motor melalui mekanisme *coupling*. Model pendekatan getaran ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Model pendekatan getaran.

D. Data Domain Waktu (Time Domain)

Pengolahan data time domain melibatkan data hasil pengukuran objek pemantauan sinyal getaran, tekanan fluida kerja, temperatur fluida kerja maupun aliran fluida kerja. Pada perakteknya pengukuran tekanan dengan menggunakan sensor tekanan tipe piezoelektrik memungkinkan mengukur sifat tekanan yang dinamik, sehingga dapat diamati perubahan tekanan dalam ruang bakar suatu mesin diesel atau perubahan tekanan fluida kerja yang mengalir dalam pipa. Dalam kasus pengukuran temperatur dengan termometer yang konvensional karena karakteristik alat ukurnya, maka tidak dapat dilakukan pengukuran temperatur secara dinamik. Demikian pula halnya dengan pengukuran aliran fluida kerja, sehingga untuk memungkinkan pengukuran objek pemantauan berupa sinyal dinamik, maka diperlukan sensor yang memiliki karakteristik dinamik tertentu. Hasil pengukuran objek pemantauan dalam domain waktu dapat berupa sinyal:

- Sinyal statik, yaitu sinyal yang karakteristiknya (misalkan amplitudo, arah kerja) yang tidak berubah terhadap waktu.
- Sinyal dinamik, yaitu sinyal yang karakteristiknya berubah terhadap waktu sehingga tidak konstan.

Sinyal dinamik yang sering ditemui dalam prakteknya berasal dari sinyal getaran, baik yang diukur menggunakan *accelerometer*, *vibrometer*, maupun sensor simpangan getaran

Guna keperluan pengolahan sinyal getaran dalam *Time Domain*, perlu diperhatikan karakteristik sinyal getaran yang dideteksi oleh masing-masing sensor akselerasi, *velocity*, dan simpangan getaran (*displacement*). Getaran berlebihan pada peralatan dan pemipaan dapat merusak bagian peralatan (seperti poros penggerak, bantalan, dan seal), melonggarkan atau mematahkan sambungan pipa, dan bahkan menyebabkan pipa pecah dalam kondisi tertentu [1]. Guna meneliti gaya induksi fluida *impeller* pompa sentrifugal dengan putaran majemuk, berdasarkan persamaan N-S, model turbulensi RNG k- ϵ diterapkan untuk mensimulasikan pompa sentrifugal kecepatan spesifik rendah dalam

kondisi perakitan eksentrik. Efek dari laju aliran yang berbeda, eksentrisitas impeler dan rasio pusaran pada gaya impeler yang diinduksi fluida diselidiki. Akhirnya, model pemasangan gaya yang diinduksi fluida dengan pusaran majemuk diperoleh dengan metode kuadrat terkecil (LSM). Hasilnya menyiratkan bahwa hasil yang dihitung dengan mempertimbangkan eksentrisitas impeler lebih dekat dengan data eksperimen daripada tanpa mempertimbangkan pusaran eksentrik. Selain itu, nilai ekstrim gaya impeler yang diinduksi fluida memiliki korelasi positif yang signifikan dengan eksentrisitas impeler [2]. Deteksi pembentukan kavitasi pada mesin turbo hidraulik telah diteliti secara luas karena dampaknya yang signifikan pada operasi yang stabil dan dinamis. Tujuan dari penelitian ini adalah penerapan alat Spectral Kurtosis untuk mendeteksi secara efektif gelombang kejut impulsif yang dihasilkan selama ledakan gelembung uap. Metodologi diterapkan dan dievaluasi pada sinyal getaran yang diperoleh dari dua impeler semi-terbuka yang berbeda. Hasil di bawah kondisi kavitasi awal menunjukkan bahwa ledakan frekuensi tinggi gelembung uap berinteraksi dengan frekuensi rendah lewat dari pisau berputar dan membentuk bagian dari sinyal getaran [3]. Kavitasi adalah masalah penting yang terjadi di setiap pompa. Ini sangat berkontribusi terhadap memburuknya kinerja pompa. Dalam aplikasi industri, penting untuk mendeteksi dan mengurangi efek kavitasi pada pompa.

Dalam pekerjaan ini, mendeteksi dan mendiagnosis fenomena kavitasi dalam pompa sentrifugal menggunakan teknik getaran diselidiki. Hasil yang diperoleh untuk sinyal getaran dalam domain waktu dan frekuensi dianalisis untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang deteksi kavitasi pada pompa yang bersangkutan. Pengaruh kondisi operasi yang berbeda termasuk berbagai laju aliran dan kecepatan rotasi pompa yang terkait dengan kavitasi diukur. Fitur statistik yang berbeda dalam analisis domain waktu (TDA) dan juga teknik Fast Fourier Transform (FFT) untuk analisis domain frekuensi (FDA) diterapkan [4]. Salah satu strategi untuk mendeteksi dan mengklasifikasikan kesalahan dalam sistem mekanis adalah dengan menggunakan keluarga teknik domain waktu yang dikenal sebagai metode keluaran saja. Metode tersebut didasarkan pada analisis matriks kovarians sampel, yang diperkirakan dari data getaran yang diekstraksi dari sistem mekanis di bawah eksitasi alami yang tidak terukur.

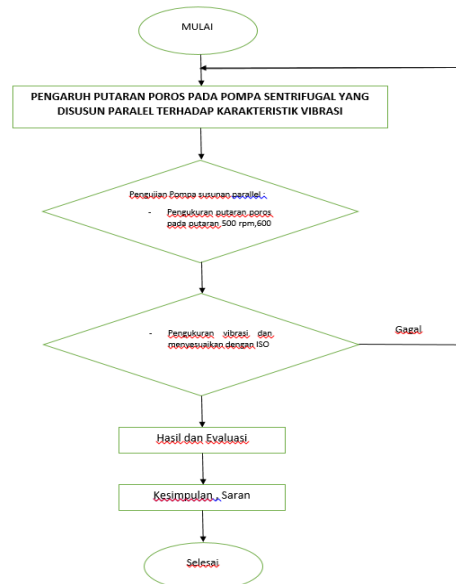
Dengan menggunakan teori realisasi stokastik, parameter Markov dapat diturunkan dari matriks kovarians sampel. Parameter tersebut hanya berisi komponen spektral yang signifikan dari data. Dalam makalah ini, metode keluaran-saja baru berdasarkan parameter Markov diusulkan untuk mendiagnosis kesalahan. Identy adalah untuk menggunakan parameter Markov yang diperkirakan dari data getaran sebagai fitur dalam algoritma klasifikasi berdasarkan optimasi cembung. Metode ini diterapkan untuk mendiagnosis kegagalan kavitasi yang baru jadi pada pompa sentrifugal jaringan suplai air. Sensor getaran triaksial murah yang

dikembangkan oleh salah satu penulis digunakan untuk mendaftarkan data getaran. Metode yang diusulkan dibandingkan dengan analisis berdasarkan matriks kovarians sampel yang menunjukkan keuntungan terkait dengan penggunaan parameter Markov [5]. Menyelidiki mekanisme efek aliran yang diinduksi pada sinyal getaran dari pompa sentrifugal dengan menggabungkan dinamika fluida komputasi (CFD) dan *cyclostationarity* sinyal. Model getaran pompa dibuat sebagai model modulasi amplitudo (AM), dan mekanisme modulasi diuraikan secara rinci. Model AM umum dianalisis secara matematis dengan kerapatan korelasi spektral dan koherensi spektral, dan solusi analitik intensitas modulasi diturunkan. Simulasi CFD transien dalam kondisi desain dan off-desain dilakukan untuk mendapatkan pulsasi tekanan dalam volute dan gaya fluida radial pada impeller [6]. Hasil yang dipilih dikumpulkan selama penyelidikan pompa sentrifugal yang digunakan dalam sistem pendingin air laut dari salah satu pembangkit listrik Diesel disajikan dalam makalah ini. Tujuan utama penelitian adalah untuk menjelaskan penyebab terjadinya patahan pada poros pompa. Penyelidikan telah menunjukkan bahwa retakan disebabkan terutama oleh resonansi antara getaran alami torsi poros pompa dan yang mengikuti dari fluktuasi tekanan yang terkait dengan frekuensi kecepatan rotasi poros dan jumlah sudu impeller. Resonansi terjadi sebagai akibat dari erosi yang kuat pada impeller pompa yang terutama berasal dari fenomena kavitasi yang menyebabkan penurunan massa impeller sekitar 20%. Lingkup penyelidikan meliputi antara lain: pengenalan kerusakan erosi, pengujian kondisi operasi pompa yang diselidiki, analisis spektral fluktuasi tekanan yang dihasilkan oleh sistem sudu pompa serta analisis kekuatan poros pompa dan frekuensi alaminya. getaran lentur dan torsional [7]. Pompa piston adalah komponen daya utama dalam sistem hidraulik pesawat sipil, dan pompa yang paling umum digunakan di bidang penerbangan adalah tipe perpindahan variabel kompensasi tekanan. Dalam makalah tinjauan ini, pengenalan dasar pompa piston pesawat sipil disajikan, termasuk klasifikasi, struktur, prinsip kerja, fitur desain, dan pencapaian oleh beberapa kelompok penelitian. Kemudian, arah masa depan pompa pesawat dilaporkan dari berbagai perspektif. Selanjutnya, teknologi kritis dianalisis dan diringkas secara rinci dari enam area dorong: pasangan gesekan, pengurangan kebisingan, dorongan masuk, manajemen termal, diagnosis kesalahan dan manajemen kesehatan, dan segel mekanis. Akhirnya, tantangan dan keterbatasan penelitian tentang pompa pesawat dibahas untuk memberikan wawasan yang berharga bagi para sarjana masa depan [8]. Getaran acak dan karakteristik transmisi gaya dari sistem poros baling-baling elastis yang disebabkan oleh turbulensi aliran masuk dipelajari secara analitis. Baling-baling dan poros disederhanakan sebagai balok elastis tiga dimensi, yang dihubungkan oleh elemen pegas yang disatukan. Hasil analisis menunjukkan bahwa elastisitas bilah baling-baling tidak dapat diabaikan dan mode pembengkokan bilah baling-baling memperkuat gaya transmisi longitudinal dan transversal. Transmisi gaya longitudinal

terutama dikendalikan oleh elastisitas baling-baling dan kekakuan longitudinal bantalan dorong, sedangkan frekuensi dan besarnya gaya transversal terutama dikendalikan oleh mode lentur poros dan elastisitas sistem, masing-masing [9]. Untuk mempelajari pengaruh jumlah sudu pada kebisingan yang diinduksi aliran dari pompa sentrifugal, metode komputasi berdasarkan kombinasi dinamika fluida komputasi dan akustik komputasi diusulkan untuk menghitung medan akustik pompa sentrifugal secara numerik [10]. Kontribusi ilmiah dari penelitian ini adalah memberikan informasi putaran pompa yang aman terhadap manusia dan bangunan. Ada beberapa penyebab vibrasi pada pompa:

- Vibrasi yang ditinjau dari aspek mekanis pada pompa seperti,
 - tidak seimbangya komponen pompa yang berputar (*impeller* atau *shaft*)
 - bengkoknya shaft
 - tegangan pada pipa
 - kerusakan pada *bearing*
 - mengendurnya ikatan baut
 - pondasi kurang lebar
 - tidak cukupnya beban pada pondasi
- Vibrasi yang disebabkan aspek hidrolis seperti,
 - pengoperasian dibawah titik efisiensi terbaik dari pompa
 - kavitasi
 - *impeller fan* berputar terlalu dekat dengan pengarah air pompa
 - perputaran air didalam pompa
 - masuknya udara pada pompa
 - terjadinya *turbulence*
 - *water hammer*
- Vibrasi yang disebabkan hal lain seperti,
 - terjadinya *harmonic* akibat vibrasi peralatan didekatnya
 - pengoperasian pompa pada putaran kritis
 - kerusakan pada *seal*

III. METODE PENELITIAN



Gambar 5. Alur pelaksanaan penelitian

A. Alat dan Bahan

1. Tachometer

Tachometer adalah sebuah instrumen atau alat untuk mengukur kecepatan putaran poros yang di gerakan mesin. Tachometer ini bekerja dengan menghitung banyaknya *rotation per minute* (RPM) atau putaran per menit.

2. Vibrometer

Guna melakukan pengukuran terhadap tingkat vibrasi yang terjadi pada pompa digunakan instrumen pengukur sinyal vibrasi, yaitu Handheld Digital Vibrometer 908B. Setting instrumen pengukur vibrasi ini dilakukan pada saat akan melakukan pengukuran sinyal vibrasi. Adapun variable yang akan diamati dalam penelitian ini adalah:

1. Simpangan (*displacement*) dari enam titik dan dua arah pengukuran.
2. Kecepatan (*velocity*) dari enam titik dan dua arah pengukuran.
3. Percepatan (*acceleration*) dari enam titik dan dua arah pengukuran

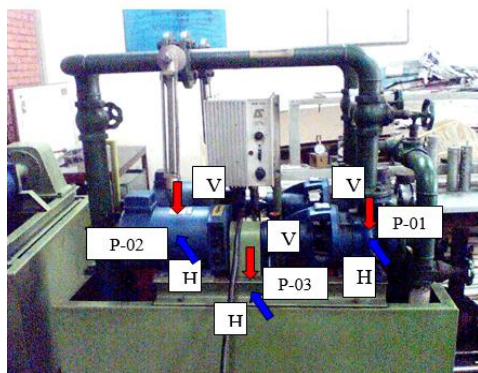
3. Manometer

Manometer digunakan untuk mengukur tekanan zat cair. Alat ini sederhana, pengamatan dapat dilakukan langsung dan cukup teliti untuk daerah pengukuran.

4. Flow Meter

Flow meter adalah alat yang digunakan untuk mengetahui adanya suatu aliran material cair atau fas dalam suatu jalur aliran, dengan segala aspek aliran itu sendiri yaitu kecepatan aliran (*flow rate*) dan total massa atau volume dari material yang mengalir dalam jangka waktu tertentu atau sering disebut dengan istilah *totalizer*. Dengan diketahuinya parameter dari aliran suatu material oleh alat ukur *flow meter* yang dikirim berupa data angka dapat juga diteruskan guna menghasilkan aliran listrik atau sinyal yang bisa digunakan sebagai input pada control atau rangkaian electric lainnya.

B. Alat



Gambar 6. Pompa sentrifugal

keterangan gambar:

- P-01 = titik pengukuran pada landasan (*base plate*)
- P-02 = titik pengukuran pada rumah *electromotor*
- P-03 = titik pengukuran pada sisi rumah pompa
- V = arah pengukuran vertical
- H = arah pengukuran horizontal

C. Teknik Pengukuran

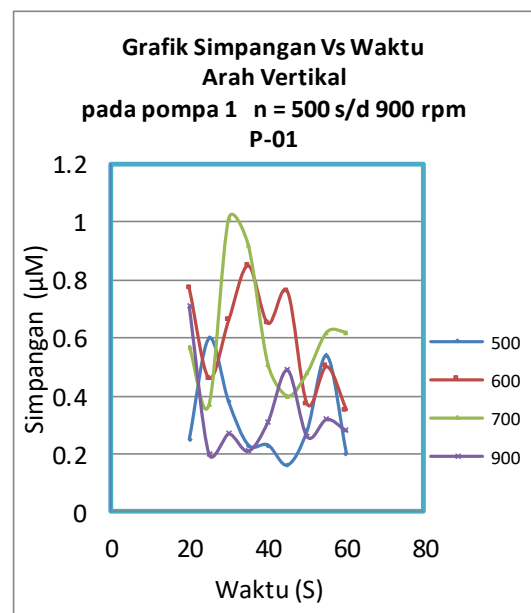
Penyelidikan sinyal vibrasi yang timbul akibat perubahan susunan pompa secara paralel dilakukan pada pompa dengan titik pengukuran searah sumbu vertikal, horizontal. Pengukuran dilakukan pada titik yang telah ditentukan dengan pengambilan data berdasarkan time domain Pengukuran kedua arah tadi dikarenakan sistem pengujian diasumsikan mempunyai 3 derajat kebebasan.

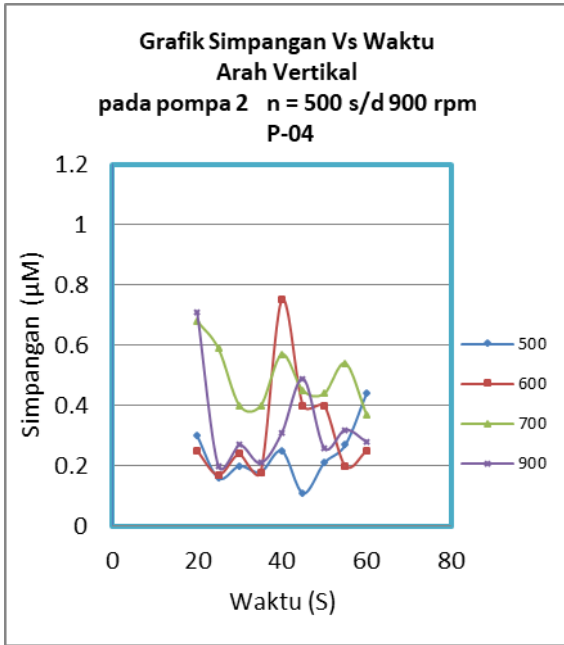
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan data sistem pengujian yang dilakukan adalah mengukur seberapa besar respon getaran pompa yang timbul pada pemberian putaran poros 500 RPM, 600 RPM, 700 RPM, dan 900 RPM. Data yang diambil dari variasi gaya ini diukur pada enam titik pengukuran yaitu pada pompa 1 dititik P-01, pada *elektromotor 1* P-02, pada landasan 1 dititik P-03, pada *pompa 2* di titik P-04, pada *electromotor 2* di titik P-05, dan pada *landasan 2* di titik P-06 berdasarkan *time domain*. Pengambilan data respon getaran pompa sentrifugal yang dihubungkan secara paralel ini dengan mengoperasikan pompa serta mengatur variasi putaran poros dengan menggunakan alat *tachometer*. Adapun tujuan pengukuran ini adalah untuk menemukan karakteristik respon getaran dari pompa sentrifugal yang dihubungkan secara paralel.

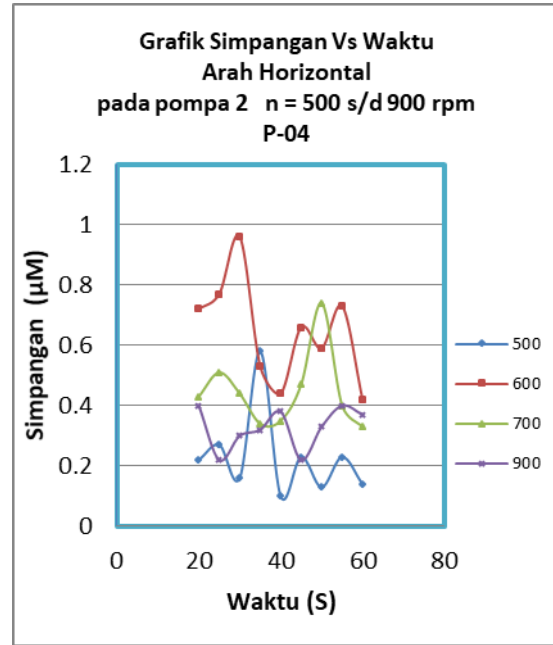
A. Perbandingan Respon Getaran pada Pompa dengan Putaran $n = 500$ RPM s.d 900 RPM.

Setelah dilakukan pengukuran pada data respon getaran dengan variasi putaran poros dari 500 RPM sampai dengan 900 RPM pada titik pengukuran arah vertikal pada pompa P-01 dan P-04 ditunjukkan pada Gambar 3.





Gambar 7. Hubungan simpangan dengan waktu arah vertikal pada pompa dengan n = 500 RPM s/d 900 RPM ; titik P-01 dan P-04

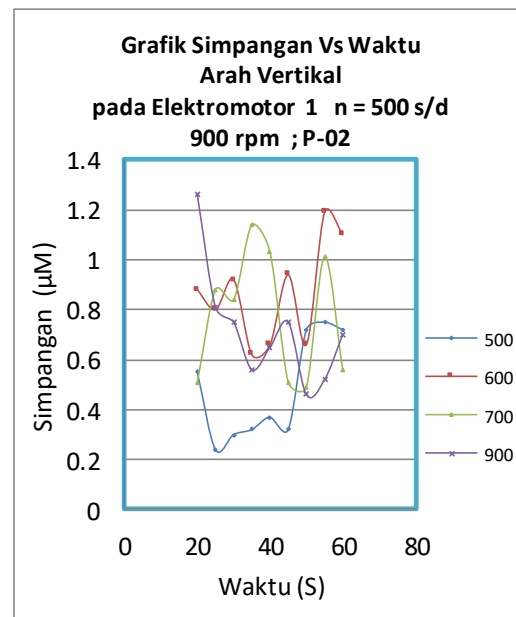
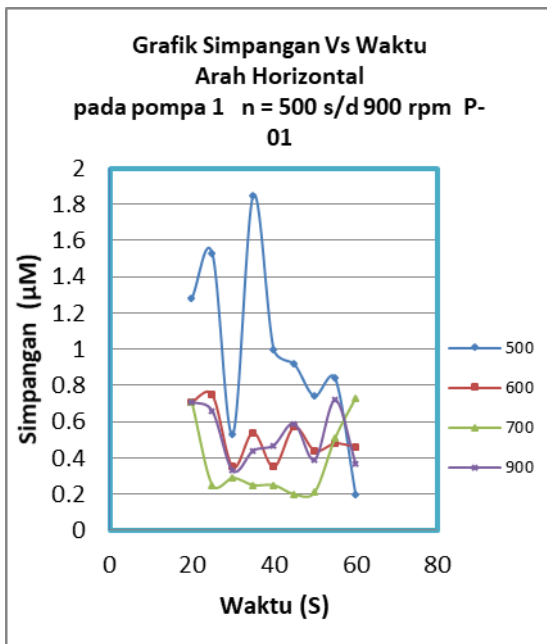


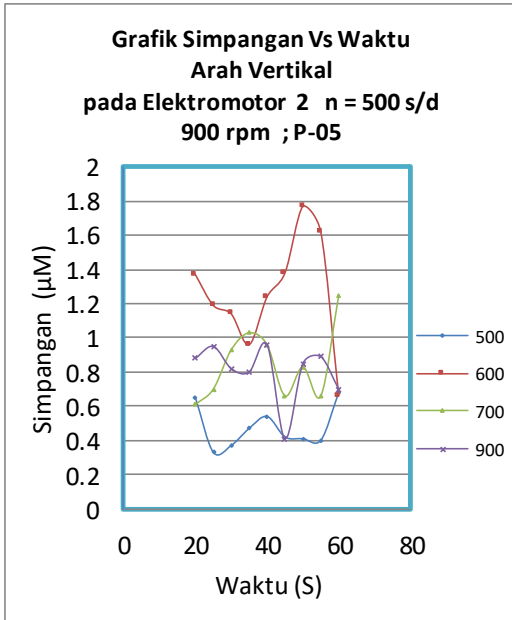
Gambar 8. Hubungan simpangan dengan waktu arah horizontal pada simpangan dengan n = 500 RPM s/d 900 RPM; titik P-01 dan P-04

Selanjutnya dilakukan pengukuran pada data respon getaran dengan variasi putaran poros n = 500 s/d 900 RPM pada titik pengukuran arah horizontal pompa P-01 dan P-04 ditunjukkan pada Gambar 4.

B. Respon Getaran Arah Vertikal dengan Putaran Poros n = 500 RPM Sampai dengan 900 RPM pada P-02 dan P05

Setelah dilakukan pengukuran pada data respon getaran dengan variasi putaran poros dari 500 RPM sampai dengan 900 RPM pada titik pengukuran pada pompa P-02 dan P-05 ditunjukkan pada Gambar 5.

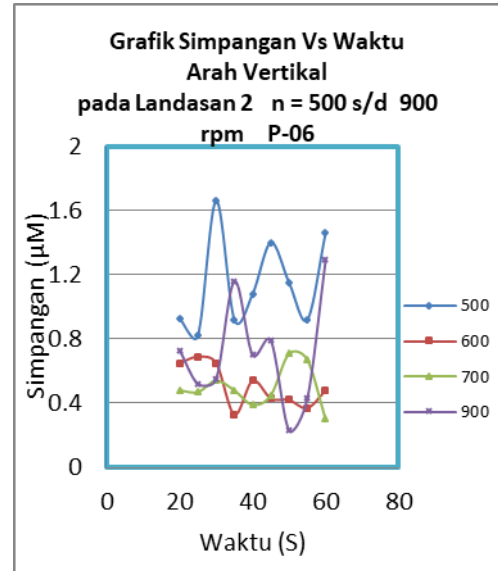
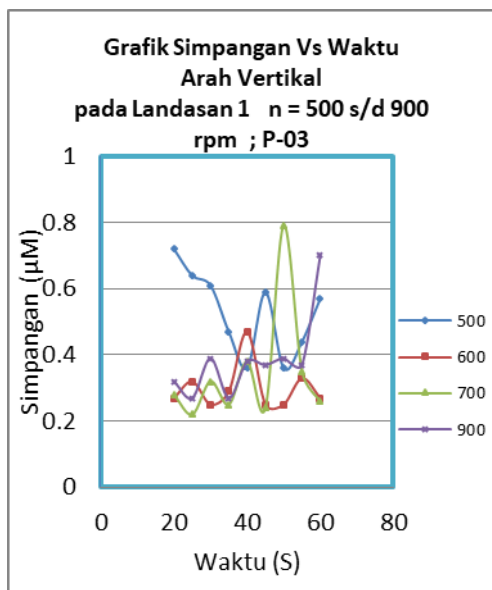




Gambar 9. Hubungan simpangan dengan waktu arah vertikal pada simpangan dengan n = 500 RPM s/d 900 RPM; titik P-03 dan P-05

C. Respon Getaran pada Arah Vertikal dengan Putaran Poros n = 500 RPM Sampai dengan 900 RPM; P-05 dan P-06

Setelah dilakukan pengukuran pada data respon getaran dengan variasi putaran poros dari 500 RPM sampai dengan 900 RPM pada titik pengukuran pada landasan 1 di titik P-05 dan pada landasan 2 di titik P-06 ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 10. Hubungan simpangan dengan waktu arah vertikal pada simpangan dengan n = 500 RPM s/d 900 RPM; titik P-03 dan P-06

D. Analisis data hasil pengukuran pada putaran 500 RPM s/d 900 RPM

Analisis pengukuran respon getaran pada putaran poros 500 RPM s/d 900 RPM dilakukan dengan mengambil harga maksimum untuk *displacement* (simpangan), *velocity* (kecepatan), *acceleration* (percepatan) untuk arah vertikal, horizontal, data pengukuran ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Getaran maksimum simpangan, kecepatan dan percepatan pada pengukuran di titik P-01, P-02, P-03, P-04, P-05 dan P-06

Titik	Simpangan (µm)		Kecepatan (cm/s)		Percepatan (cm/s ²)	
	Vertikal	Horizontal	Vertikal	Horizontal	Vertikal	Horizontal
Pompa 1 (P-01)	1.01	1.85	3.30	3.50	17.1	15.8
Elektromotor 1 (P-02)	1.26	1.22	4,46	4,37	15,4	26,7
Landasan 1 (P-03)	0,93	1,10	3,12	3,10	28,4	29,6
Pompa 2 (P-04)	0,79	0,75	3,30	3,34	23,6	27,3
Elektromotor 2 (P-05)	1,77	1,14	4,56	4,22	25,7	28,8
Landasan 2 (P-06)	1,66	1,36	3,32	3,12	48,6	33,1

Mesin pompa yang digunakan adalah tipe medium. Dengan menggunakan Standart ISO 10816-3 untuk kecepatan (*velocity*) titik P-01, P-02, P-03, P-04, P-05,

dan P-06 pada $n = 500$ RPM s/d 900 RPM diperoleh harga kecepatan (*velocity*) terbesar $4,56$ m/s di titik P-05 berada pada zona C berwarna kuning, getaran dari mesin dalam batas toleransi dan hanya dioperasikan dalam waktu terbatas. Berdasarkan data hasil pengujian dapat dilihat simpangan pada pompa 1 lebih besar daripada pompa 2 dan percepatan yang diberikan pada pompa memberikan pengaruh getaran lebih kecil seperti yang diberikan pada pompa 2, dengan semakin kecilnya kecepatan maka suatu mesin akan mengalami getaran yang besar.

V. KESIMPULAN

Hasil respon getaran maksimum yang paling rendah terdapat pada pompa di titik P-04 pada $n = 500$ RPM dengan harga simpangan $0,75 \times 10^{-6}$ m arah horizontal sedangkan yang paling tinggi terdapat pada pompa di titik P-01 pada $n = 500$ RPM dengan harga simpangan $1,85 \times 10^{-6}$ m arah horizontal. Dari hasil pengukuran respon getaran yang diukur pada pompa, elektromotor, landasan dapat disimpulkan bahwa simpangan terbesar terjadi pada pompa di titik P-01 dengan harga simpangan $1,85 \times 10^{-6}$ m arah horizontal, diikuti elektromotor di titik P-05 dengan harga simpangan $1,77 \times 10^{-6}$ m arah vertikal kemudian landasan di titik P-06 dengan harga simpangan $1,66 \times 10^{-6}$ m arah vertikal. Menurut standart ISO 10816-3 untuk *velocity* pada pompa dengan harga tertinggi vertikal $4,56$ m/s di titik P-05 dikategorikan pada zona C berwarna kuning, getaran dari mesin dalam batas toleransi dan hanya dioperasikan dalam waktu terbatas, untuk arah horizontal harga tertinggi $4,37$ m/s di titik P-02 dikategorikan pada zona B berwarna hijau muda, getaran dari mesin baik dan dapat dioperasikan tanpa larangan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih diucapkan kepada seluruh keluarga, anak, dan istri, rekan dosen peneliti, mahasiswa teknik mesin UHKBNP, dan seluruh pihak yang berpartisipasi dalam penelitian dan penyelesaian jurnal ini.

REFERENSI

- [1] J. G. Lilly *et al.*, *Chapter 22 Vibration and Noise*, Third Edit. Elsevier Ltd, 1998.
- [2] W. Zhou, Y. Wang, C. Li, W. Zhang, and G. Wu, "Analysis of fluid-induced force of centrifugal pump impeller with compound whirl," *Alexandria Eng. J.*, vol. 59, no. 6, pp. 4247–4255, 2020, DOI: 10.1016/j.aej.2020.07.028.
- [3] G. Mousmoulis, C. Yiakopoulos, G. Aggidis, I. Antoniadis, and I. Anagnostopoulos, "Application of Spectral Kurtosis on vibration signals for the detection of cavitation in centrifugal pumps," *Appl. Acoust.*, vol. 182, p. 108289, 2021, DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.108289.
- [4] A. R. Al-Obaidi, "Investigation of effect of pump rotational speed on performance and detection of cavitation within a centrifugal pump using vibration analysis," *Heliyon*, vol. 5, no. 6, p. e01910, 2019, DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01910.
- [5] J. P. S. Gonçalves, F. Fruett, J. G. Dalfré Filho, and M. Giesbrecht, "Faults detection and classification in a centrifugal pump from vibration data using markov parameters," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 158, 2021, DOI: 10.1016/j.ymsp.2021.107694.
- [6] S. Li, N. Chu, P. Yan, D. Wu, and J. Antoni, "Cyclostationary approach to detect flow-induced effects on vibration signals from centrifugal pumps," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 114, pp. 275–289, 2019, DOI: 10.1016/j.ymsp.2018.05.027.
- [7] A. Adamkowski, A. Henke, and M. Lewandowski, "Resonance of torsional vibrations of centrifugal pump shafts due to cavitation erosion of pump impellers," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 70, pp. 56–72, 2016, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.07.011.
- [8] S. GUO, J. CHEN, Y. LU, Y. WANG, and H. DONG, "Hydraulic piston pump in civil aircraft: Current status, future directions and critical technologies," *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 33, no. 1, pp. 16–30, 2020, DOI: 10.1016/j.cja.2019.01.013.
- [9] W. Kang, Z. Zhang, K. Zhou, and Y. Chen, "The random vibration and force transmission characteristics of the elastic propeller-shafting system induced by inflow turbulence," *Ocean Eng.*, vol. 188, no. January, p. 106317, 2019, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106317.
- [10] W. Yu-qin and D. Ze-wen, "Influence of blade number on flow-induced noise of centrifugal pump based on CFD/CA," *Vacuum*, vol. 172, no. November 2019, p. 109058, 2020, DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.109058.