

ANALISIS GETARAN PAKSA PADA TURBIN UAP UNTUK EVALUASI KEANDALAN MENGGUNAKAN METODE KUANTITATIF

Nu Rhahida Arini¹⁾, Nur Faidah²⁾, Hendrik³⁾, Diva

^{1,2,3,4} Prodi Sistem Pembangkit Energi

Department Teknik Mekanika dan Energi

Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

email: arini@pens.ac.id

Abstract

A steam turbine operates at high rotational speed, generating significant centrifugal forces that can induce vibrations and lead to failures such as fatigue, ultimately reducing its reliability. This study aims to enhance steam turbine reliability through a forced vibration analysis approach, which includes vibration monitoring and selecting an appropriate maintenance strategy using a quantitative method implemented in GNU Octave. For a steam mass flow rate of 187.09 t/h, the dominant vibration frequency of 33.8 Hz is close to the system's natural frequency of 31.8 Hz, indicating a high risk of resonance. Maintaining the flow rate between 211 t/h and 243 t/h effectively shifts the dominant frequency away from the natural frequency, reducing this risk. Based on the load condition, the remaining service life is estimated at 5.3 years, with predictive maintenance identified as the most suitable strategy.

Keywords: Steam Turbine, Forced Vibration, Fatigue, Resonance Frequency, Predictive Maintenance, Reliability Improvement

PENDAHULUAN

Salah satu peralatan penting di pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) adalah turbin uap. Turbin uap bekerja dengan mengubah energi internal uap menjadi energi kinetik untuk memutar poros yang terhubung dengan generator. Permasalahan pada turbin uap sebagian besar disebabkan oleh getaran karena turbin uap beroperasi pada kecepatan putar yang tinggi. Getaran mempengaruhi rotasi dan keseimbangan turbin, menurunkan efisiensi, mengurangi keandalan, dan menyebabkan pergeseran poros. Jika dibiarkan tanpa penanganan, kinerja turbin akan mengalami penurunan. Oleh karena itu, turbin uap memerlukan perawatan agar tetap beroperasi dengan kinerja prima, dengan memantau

getarannya. Pemantauan getaran merupakan teknik yang paling efektif untuk mendeteksi pengaruh getaran mekanik dalam perputaran mesin (Carnegie, Suryadi, & Fitrilina, 2020). Getaran merupakan salah satu parameter penting yang harus dimonitor karena dapat menjadi indikator adanya deviasi pada sistem. Deviasi tersebut dapat terdeteksi melalui peningkatan nilai getaran secara tiba-tiba maupun bertahap. Faktor penyebab deviasi ini dapat dianalisis melalui grafik spektrum getaran. Grafik spektrum tersebut diperoleh dengan menghitung amplitudo pada domain waktu yang kemudian dikonversi ke domain frekuensi menggunakan algoritma Fast Fourier Transform (FFT) (Meyer, 2022). Sistem getaran bebas juga dapat digunakan untuk mengevaluasi kegagalan pada turbin uap (Faqih et al., 2021). Namun demikian kondisi real akan lebih terbaca jika evaluasi kegagalan dilakukan dengan pendekatan getaran paksa. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan keandalan turbin uap dengan menerapkan strategi getaran paksa. Dengan menggunakan metode kuantitatif, studi kasus dilakukan dengan data operasional PLTU sehingga dapat diterapkan di kasus sebenarnya.

METODE PENELITIAN

Getaran paksa adalah getaran yang muncul akibat adanya gaya eksitasi eksternal. Gaya eksternal ini berasal dari laju aliran massa uap yang masuk ke dalam turbin uap. Melalui evaluasi getaran paksa ini, kondisi turbin uap dapat diketahui secara real-time. Sehingga strategi pemeliharaan dapat disusun dengan lebih terencana, menekan potensi kerusakan, dan menjaga turbin tetap beroperasi secara optimal dengan meminimalkan getaran serta meningkatkan keandalannya. Penelitian ini menggunakan tiga metode, yaitu analisis getaran paksa, analisis kelelahan material, dan analisis keandalan. Pada analisis keandalan turbin, metode kuantitatif digunakan. Metode ini menyelesaikan model keandalan dengan menggunakan pendekatan matematis. Nilai keandalan digunakan untuk menentukan jenis perawatan yang tepat. Penyebab penurunan nilai keandalan dapat diketahui dengan menganalisis getaran melalui grafik spektrum.

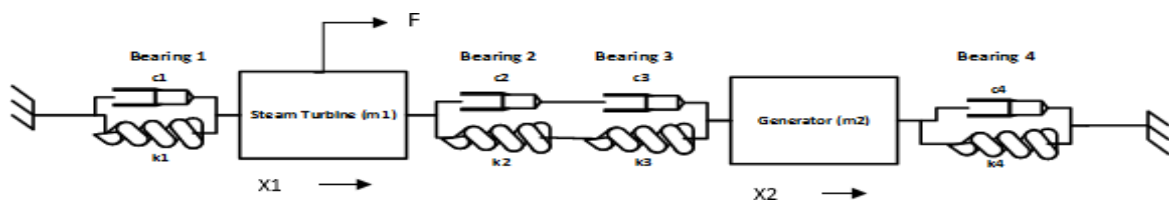
Getaran Paksa

Getaran adalah gerakan berulang atau osilasi dalam interval waktu tertentu. Getaran secara umum dibagi menjadi dua jenis, yaitu getaran bebas dan getaran paksa. Gerakan osilasi ini diakibatkan karena gangguan awal, dimana pada getaran bebas diasumsikan tanpa adanya gaya luar, sebaliknya dengan getaran paksa (Bhaskar dan Varadan, 2021).

Getaran paksa dapat berbahaya apabila frekuensinya mendekati frekuensi alami, yaitu frekuensi osilasi sistem tanpa redaman dan gaya eksitasi. Setiap mesin dengan material berbeda memiliki frekuensi alami yang berbeda, bergantung pada karakteristiknya. Untuk mencegah resonansi, getaran sebaiknya dihindarkan dari frekuensi alami menggunakan Persamaan 1:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot A}} \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \dots\dots\dots 1$$

Di mana f adalah frekuensi alami, E adalah modulus elastisitas, I adalah momen inersia, A adalah luas penampang, L adalah panjang objek, dan ρ densitas material. Analisis getaran dimulai dengan memodelkan sistem dalam bentuk diagram blok dan menentukan koordinat pengamatan. Elemen-elemen dari sistem getaran meliputi massa (m), pegas (k), redaman (c), dan gaya eksitasi (F). Turbin dan generator yang dianalisa, diasumsikan sebagai dua massa yang bergerak dan dimodelkan sebagai objek dua derajat kebebasan (Degree of Freedom) seperti Gambar 1.



Gambar 1. Pemodelan Vibrasi dengan Sistem Dua Derajat Kebebasan

Gambar 1 menunjukkan model turbin dan generator yang di support oleh 4 bearing dengan gaya eksternal diberikan pada turbin. Masing-masing bearing mempunyai koefisien redaman yang berbeda sehingga persamaan getaran paksa diberikan oleh Persamaan 2.

$$F = m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2 + c_3) \dot{x}_1 + (k_1 + k_2 + k_3) x_1 - (c_2 + c_3) \dot{x}_2 - (k_2 + k_3) x_2 \dots\dots 2$$

Di mana F adalah gaya eksternal, m adalah massa, k adalah kekakuan, c adalah konstanta redaman, dan \dot{m} adalah laju aliran massa uap. Gaya eksternal pada turbin berasal dari laju aliran massa uap yang masuk ke turbin, di mana gaya tersebut dipengaruhi oleh perubahan momentum aliran uap. Secara umum, gaya eksternal ini diformulasikan sebagai:

$$F = \dot{m} (C_1 \cdot \cos \alpha_1 - C_2 \cdot \cos x) \dots\dots\dots 3$$

Di mana \dot{m} adalah laju aliran massa uap, C_1 adalah kecepatan absolut uap keluar dari nosel, C_2 adalah kecepatan absolut uap keluar dari sudu, α adalah sudut nosel, dan x adalah sudut keluaran sudu. Persamaan ini merupakan model dasar dari teori momentum

fluida yang umum digunakan dalam studi turbomachinery untuk menghitung gaya eksitasi akibat aliran uap (Basu & Debnath, 2020). Redaman pada Persamaan 2 berfungsi untuk mengurangi atau menghilangkan getaran pada mesin, sedangkan konstanta redaman (c), konstanta pegas (k), viskositas (μ), dan modulus geser (G) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan dasar redaman dan elastisitas (Rusianto & Susastriawan, 2021).

$$c = \frac{\mu A}{h} \dots\dots\dots 4$$

$$\mu = \rho \nu \dots\dots\dots 5$$

$$k = \frac{G \cdot I}{L} \dots\dots\dots 6$$

Data diperoleh dari sebuah pembangkit, meliputi laju aliran massa uap yang masuk ke turbin, kecepatan uap keluar dari nosel dan sudu turbin, geometri rotor, massa turbin dan generator, serta material yang digunakan. Data-data tersebut diolah menggunakan perangkat lunak GNU Octave. Evaluasi getaran paksa dilakukan dengan mencari amplitudo perpindahan pada domain waktu, kemudian dikonversi ke domain frekuensi melalui algoritma Fast Fourier Transform (FFT). FFT adalah algoritma yang digunakan untuk melakukan analisis Transformasi Fourier. Transformasi Fourier merupakan proses matematis yang berfungsi menyederhanakan spektrum kompleks menjadi komponen-komponen sinusoidal melalui proses transformasi dari domain waktu ke domain frekuensi.

Pada studi kasus yang diambil, turbin uap menggunakan material baja paduan Ni-Cr alloy steel. Sistem redaman pada turbin uap menggunakan fluida pelumas jenis lube-oil tipe VG46. Sifat-sifat material baja Ni-Cr, parameter perhitungan konstanta redaman, koefisien kekakuan, dan frekuensi alaminya dapat dilihat pada Tabel I

Tabel 1
Parameter perhitungan konstanta redaman dan kekakuan

Parameter	Nilai	Satuan
Massa Jenis (ρ)	870	kg/m ³
Viskositas kinematik (ν)	46	mm ² /s
Viskositas absolut (μ)	0,04002	N·s/m ²
Diameter bantalan	340	mm

Panjang rotor	5,86	m
Massa rotor turbin	19,400	Kg
Massa rotor generator	22.000	Kg
Diameter rotor	0,279	m
Massa turbin	111.855,88	Kg
Massa generator	220.000	Kg
Massa poros	19.647,078	Kg
Modulus elastisitas (E)	2.15E+11	Pa
Massa jenis (ρ)	7840	kg/m ³

Analisis Fatigue

Fatigue adalah kegagalan material akibat pembebanan dinamis. Fatigue failure dapat terjadi dalam dua bentuk: high cycle fatigue (HCF), yang biasanya terjadi karena regangan elastis kecil dalam jumlah siklus yang sangat besar, dan low cycle fatigue (LCF), yang ditandai oleh regangan plastis signifikan dan kegagalan dalam jumlah siklus yang relatif kecil (Majid et al., 2023). High cycle fatigue (HCF) adalah jenis fatigue yang disebabkan oleh tegangan elastis kecil dengan jumlah siklus antara 10^6 hingga 10^8 atau lebih sebelum kegagalan terjadi (Motte, 2024). Sebaliknya, low-cycle fatigue (LCF) terjadi pada kondisi tegangan tinggi dengan deformasi plastis, dan umumnya menyebabkan kegagalan dalam jumlah siklus rendah, yaitu antara 10^4 hingga 10^5 siklus (Farhat, 2021). Dengan menghitung nilai tegangan terhadap jumlah siklus, dapat diketahui umur material ketika mengalami pembebanan dinamis. Persamaan untuk menghitung jumlah siklus dan umur material dapat dilihat pada Persamaan (24) hingga Persamaan (29) (Yilmaz, *Material Science and Engineering 207: Material Science I Chapter 6*).

$$Sa = \frac{F}{A} \dots\dots\dots 7$$

$$b = \frac{1}{3} \log\left(\frac{(0.8 \times Sut)}{Se}\right) \dots\dots\dots 8$$

$$c = \log\left(\frac{(0.8 \times Sut)^2}{Se}\right) \dots\dots\dots 9$$

$$N = \left(\frac{Sa}{c}\right)^{\frac{1}{b}} \dots\dots\dots 10$$

Di mana S_a adalah amplitudo tegangan, F adalah gaya, A adalah luas penampang, S_{ut} adalah tegangan tarik maksimum, S_e adalah tegangan batas umur tak terbatas, dan N adalah jumlah siklus.

Analisis Keandalan

Metode kuantitatif dalam analisis keandalan digunakan untuk menghitung Time to Failure (TTF), Mean Time to Failure (MTTF), keandalan, laju kegagalan, interval perawatan, dan jenis perawatan berdasarkan nilai keandalan kumulatif. TTF adalah waktu dari satu kegagalan hingga kegagalan berikutnya. Rata-rata TTF adalah MTTF. Keandalan adalah probabilitas suatu mesin yang beroperasi tanpa kerusakan dalam periode tertentu. Keandalan juga dikenal sebagai probabilitas suatu mesin dalam menjalankan fungsinya. Khudhur et al. (2024) menyatakan bahwa fungsi keandalan didefinisikan sebagai probabilitas bahwa suatu sistem atau perangkat akan beroperasi selama periode waktu t tanpa kegagalan. Persamaan keandalannya sebagai berikut :

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_0^\infty f(t) dt \dots \dots \dots 11$$

Di mana $F(t)$ adalah fungsi kepadatan kumulatif, $f(t)$ adalah fungsi kepadatan probabilitas, dan $R(t)$ adalah keandalan. Kumar, Singh, dan Tripathi (2022) menyatakan bahwa laju kegagalan merepresentasikan batas dari probabilitas terjadinya kegagalan per satuan waktu, dengan asumsi tidak ada kegagalan sebelumnya, dan dinyatakan dalam jumlah kegagalan per satuan waktu. Naz Sindhu et al. (2023) menyatakan bahwa hazard rate atau laju kegagalan $\lambda(t)$ dapat dinyatakan sebagai berikut :

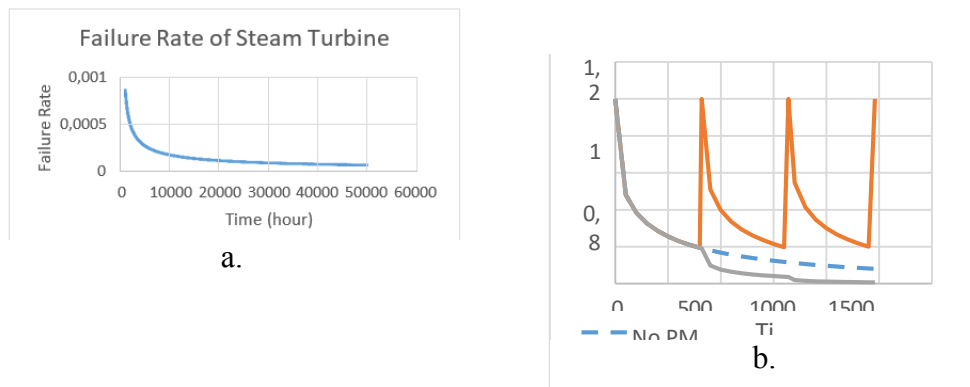
$$\lambda \frac{(t)}{R(t)} \dots \dots \dots 12$$

Laju kegagalan suatu komponen dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu Decreasing Failure Rate (DFR), Constant Failure Rate (CFR), dan Increasing Failure Rate (IFR). Pada fase DFR, kegagalan yang terjadi umumnya disebabkan oleh ketidaksempurnaan proses manufaktur. Kalibrasi dan pengujian rutin diperlukan untuk mengurangi kegagalan pada fase ini. Pada fase CFR, kegagalan terjadi secara acak sehingga jenis perawatan yang tepat adalah perawatan korektif. Sedangkan pada fase IFR, kerusakan disebabkan oleh kelelahan material, korosi, dan penuaan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Keandalan

Tabel III menunjukkan data TTF turbin uap yang diperoleh dari data downtime selama lima tahun pada turbin uap PLTU berkapasitas 65 MW. Hasil analisis menunjukkan bahwa jenis distribusi dengan nilai Anderson-Darling terendah adalah distribusi Weibull, yaitu sebesar 1,548. Oleh karena itu, dapat diasumsikan bahwa data mengikuti distribusi Weibull. Nilai parameter bentuk pada TTF turbin uap adalah 0,38632 dan parameter skala sebesar 223,431. Berdasarkan parameter tersebut, Pada gambar 4 laju kerusakan turbin uap menunjukkan tren menurun seiring waktu. Laju kerusakan ini dikategorikan sebagai Decreasing Failure Rate (DFR) karena memiliki nilai parameter kurang dari 1.



Gambar 4. a. Tingkat Kegagalan Turbin Uap, b. Keandalan turbin uap

Tabel 3

Data TTF turbim Uap

Hari	Mulai	Selesai	TTR	TTF
Hari 1	09.28	23.01	13.55	0
Hari 2	16.29	18.02	1.55	185.4667
Hari 3	04.07	05.07	1	12941.08
Hari 5	08.28	10.26	1.966667	459.35
Hari 6	00.00	00.00	192	744
Hari 7	01.00	00.00	479	1
Hari 8	19.38	00.00	52.36667	2859.883
Hari 9	04.08	04.18	216.1667	4.133333

MTTF (Mean Time To Failure) dari turbin uap adalah 819.768 jam. Nilai ini menunjukkan bahwa rata-rata kegagalan terjadi setelah turbin beroperasi selama 819.768 jam. Oleh karena itu, perhitungan reliabilitas dilakukan berdasarkan interval perawatan

(T) yang mengacu pada nilai MTTF. Hasil perhitungan reliabilitas divisualisasikan pada Gambar 5.

Gambar 5 menunjukkan bahwa reliabilitas turbin uap tanpa perawatan menurun seiring waktu, $R(t)$. Ketika perawatan preventif pertama dilakukan pada 819.768 jam, reliabilitas ($R(t-nT)$) meningkat menjadi 1 (100%). Kemudian reliabilitas kembali menurun hingga perawatan kedua dilakukan. Setelah perawatan kedua pada 1600 jam, reliabilitas kembali meningkat menjadi 1 (100%) dan menurun lagi hingga perawatan berikutnya. Secara kumulatif, reliabilitas turbin uap dengan perawatan preventif, $R_m(t)$, terus menurun dari waktu ke waktu dan berada di bawah nilai reliabilitas tanpa perawatan, $R(t)$.

Perawatan prediktif lebih sesuai untuk memantau kondisi turbin uap. Hal ini disebabkan karena nilai realibilitas pada perawatan preventif justru lebih rendah dibandingkan tanpa perawatan. Dengan demikian, penerapan perawatan preventif pada turbin uap menjadi kontradiktif terhadap peningkatan nilai reliabilitas turbin. Kegiatan perawatan prediktif yang sesuai untuk diterapkan pada turbin uap meliputi pemeriksaan dan analisis oli pelumas turbin, pemantauan getaran, pemantauan termografi, pengujian non-destruktif, dan pengukuran alignment. Kegiatan ini dilakukan setiap satu bulan sekali, karena berdasarkan nilai MTTF, turbin uap mengalami kerusakan setiap 819,76 jam operasi. Permasalahan pada turbin uap meliputi misalignment, kelelahan material (fatigue), erosi, dan korosi. Hal ini disebabkan oleh uap kering, partikel padat, dan tetesan dalam uap, serta getaran. Pada mesin berputar, sekitar 80% kegagalan disebabkan oleh getaran (Carnegie, Suryadi, & Fitrilina, 2020). Oleh karena itu, prioritas utama dalam perawatan prediktif Adalah analisis getaran paksa (forced vibration analysis).

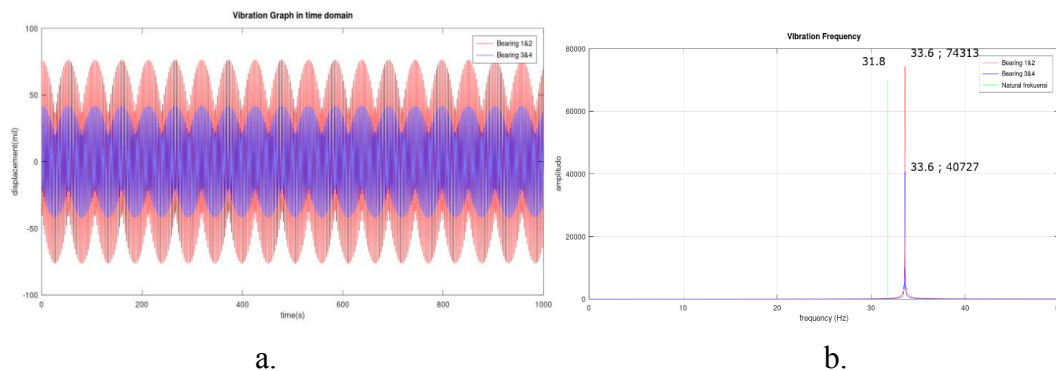
Perhitungan Frekuensi Alami

Frekuensi alami turbin uap diperoleh sebagai fungsi dari koefisien pegas material dan massa sesuai dengan Persamaan (3) hingga (4), sehingga frekuensi alami sistem yang dihitung adalah 31,8 Hz.

Analisis Getaran Paksa

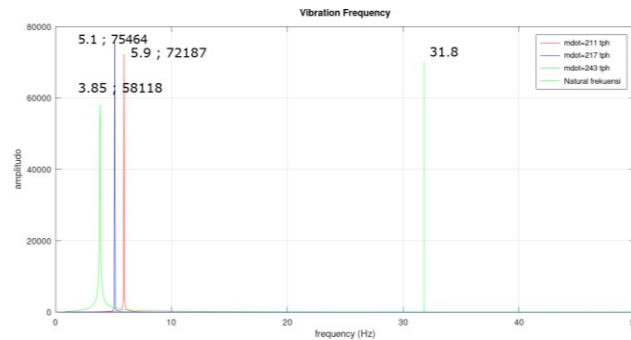
Dua studi kasus operasional diambil dalam penelitian ini yaitu dengan laju massa 187.09 ton/jam dan 211 ton/h. Selama beroperasi bantalan 1 dan 2 menopang turbin uap, sedangkan bantalan 3 dan 4 menopang generator yang terhubung dengan poros turbin.

Data getaran dalam domain waktu pada laju aliran massa sebesar 187,09 ton/jam ditunjukkan pada Gambar 5a.



Gambar 5. Getaran turbin: a. domain waktu, b. getaran dalam domain frekuensi

Berdasarkan Gambar 5a, amplitudo perpindahan pada bantalan turbin lebih tinggi dibandingkan dengan bantalan generator. Amplitudo getaran pada bantalan turbin mencapai 76 mm, sedangkan pada bantalan generator sebesar 41 mil. Batas maksimum trip (penghentian otomatis) untuk turbin uap adalah 70 mm, sehingga dalam kondisi ini, turbin uap mengalami trip karena nilai getaran melebihi 70 mm. Amplitudo perpindahan di domain waktu dikonversi ke domain frekuensi melalui algoritma FFT yang ditampilkan pada gambar 5b. Frekuensi dominan pada bantalan turbin-generator muncul pada frekuensi 33,6 Hz, sedangkan frekuensi alami turbin adalah 31,8 Hz. Frekuensi dominan ini berada cukup dekat dengan frekuensi alami, dengan selisih sebesar 1,8 Hz. Oleh karena itu, resonansi kemungkinan besar dapat terjadi. Pada mesin berputar, resonansi harus dihindari karena dapat menyebabkan getaran tinggi yang membahayakan komponen dan lingkungan. Berdasarkan frekuensi dominan yang muncul, jenis kerusakan yang terjadi pada turbin uap dan generator adalah *oil whirl*, karena frekuensi dominannya $<1X$ RPM. *Oil whirl* merupakan getaran yang terjadi pada bantalan jurnalnya akibat kerusakan sabuk atau pada mesin dengan sistem pelumasan oli bertekanan. Frekuensi domain getaran turbin pada laju massa 211 ton/jam diberikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Spektrum getaran laju aliran massa uap dalam rentang 211 ton/jam

Gambar 6 menunjukkan pada laju aliran 211 ton/h frekuensi dominan muncul di kisaran 3 Hz hingga 6 Hz. Frekuensi dominan ini berada sangat jauh dari frekuensi alami, sehingga tidak terdapat potensi terjadinya resonansi.

SIMPULAN

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa jenis pemeliharaan yang paling tepat untuk diterapkan pada turbin uap adalah predictive maintenance. Predictive maintenance pada turbin uap meliputi pemeriksaan dan analisis oli pelumas turbin, pemantauan getaran, pemantauan termografi, uji non-destruktif, serta pengukuran keselarasan (alignment). Berdasarkan sinkronisasi getaran terhadap frekuensi alami, jika beban uap sebesar 187,09 t/h, maka frekuensi dominan muncul pada 33,6 Hz dan berada sangat dekat dengan frekuensi alami. Oleh karena itu, resonansi sangat mungkin terjadi. Maka, disarankan agar beban dijaga pada rentang 211 t/h hingga 243 t/h. Berdasarkan perhitungan umur pakai pada kondisi beban rata-rata saat ini, turbin uap akan mengalami kegagalan akibat kelelahan material (fatigue failure) setelah 3,3 tahun. Artinya, sisa umur pakai turbin uap saat ini diperkirakan tinggal sekitar 2,9 tahun

DAFTAR PUSTAKA

- Basu, S., & Debnath, S. (2020). *Fundamentals of turbomachinery*. New Delhi, India: McGraw-Hill Education.
- Bhaskar, R., & Varadan, T. K. (2021). *Mechanical vibrations: Theory and applications*. New York, NY: Springer.
- Carnegie, R., Suryadi, H., & Fitrilina, L. (2020). Vibration analysis for predictive maintenance in steam turbines. *Journal of Mechanical Engineering Research*, 12(3), 145–154.
- Farhat, M. (2021). Low cycle fatigue behavior of metals under high stress. *International Journal of Fatigue*, 143, 106003. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106003>
- Faqih, M., Arini, N. R., & Prasetya, H. E. G. (2021). The development of a reliability evaluation application for power plant steam turbine vibrations to predict its failure. *EMITTER International Journal of Engineering Technology*, 9(2), 349–370. <https://doi.org/10.24003/emitter.v9i2.579>
- Faqih, A., Santoso, D., & Wicaksono, A. (2021). Free vibration analysis for steam turbine failure evaluation. *Journal of Energy Systems*, 15(2), 67–75.
- Khudhur, M., Al-Khazraji, H., & Alwan, A. (2024). Reliability modeling of rotating machinery using quantitative methods. *International Journal of Engineering Research*, 13(1), 45–53.
- Kumar, P., Singh, R., & Tripathi, M. (2022). Failure rate analysis and maintenance strategies in industrial systems. *Journal of Quality and Reliability Engineering*, 2022, Article 1345968. <https://doi.org/10.1155/2022/1345968>
- Majid, A., Roslan, R., & Hamzah, N. (2023). High cycle fatigue analysis in alloy steels. *Materials Science Forum*, 1095, 215–223.
- Meyer, T. (2022). *Fourier transform and its engineering applications*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Motte, J. (2024). High cycle fatigue in turbine blades: Experimental and simulation studies. *Journal of Mechanical Fatigue*, 118, 102–114.
- Naz Sindhu, M., Khan, A., & Yousaf, M. (2023). Hazard rate modeling and reliability assessment of mechanical systems. *Journal of Engineering Failure Analysis*, 144, 106890.
- Rusianto, E., & Susastriawan, A. (2021). Damping and elasticity characteristics of industrial machinery components. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(9), 4289–4299.
- Yılmaz, İ. H. (n.d.). *Material science and engineering 207: Material science I chapter 6*. Retrieved from <https://www.materialscience207.com>