

TUGAS AKHIR

ANALISIS PENGARUH VIBRASI TERHADAP KINERJA TURBIN UAP

*Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Elektro Pada Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Disusun Oleh:

SURYA DHARMA
2107220076



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2025**

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan oleh:

Nama : Surya Dharma

NPM : 2107220076

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Vibrasi Terhadap Kinerja Turbin Uap

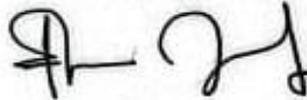
Bidang Ilmu : Sistem Kendali

Telah Berhasil dipertahankan di hadapan tim penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 13 September 2025

Mengetahui dan menyetujui

Dosen Pembimbing



Dr. Elvy Sahnur Nasution S.T., M.Pd

Dosen Pembanding I



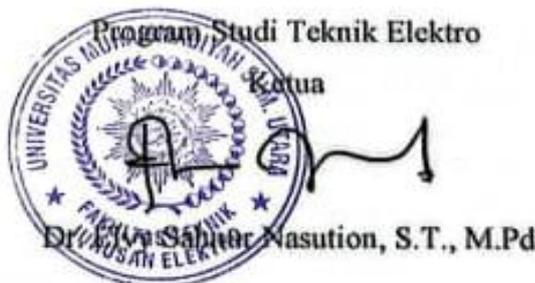
Faisal Irsan Pasaribu, S.T, S.Pd., M.T

Dosen Pembanding II



Arya Rudi Nasution, S.T., M.T

Program Studi Teknik Elektro
Ketua



Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Surat yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Surya Dharma

Tempat / Tanggal Lahir : Tanjung Keliling / 08 Januari 2001

NPM : 2107220076

Fakultas : Teknik

Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan Sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan tugas akhir saya yang berjudul:

“Analisis Pengaruh Vibrasi Terhadap Kinerja Turbin Uap”

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian kerja hasil milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinil dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan / keserjanaan saya

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 13 September 2025

Saya yang menyatakan,



10000
METERAI TEMPEL
F1BAJX849686121

Surya Dharma

ABSTRAK

Turbin uap merupakan salah satu komponen vital dalam sistem pembangkit energi di pabrik kelapa sawit, yang berfungsi untuk mengubah energi termal dari uap air menjadi energi mekanik melalui proses ekspansi. Efisiensi kerja turbin uap sangat menentukan tingkat optimalisasi konversi energi dalam sistem pembangkitan. Namun dalam praktiknya, turbin tidak selalu beroperasi dalam kondisi ideal. Penurunan efisiensi sering kali terjadi akibat berbagai faktor, salah satunya adalah getaran yang berlebihan pada komponen berputar. Data yang dikumpulkan mencakup laju aliran massa uap, entalpi uap masuk dan keluar, serta daya keluaran aktual turbin. Pengukuran getaran dilakukan pada dua titik utama, yaitu bearing depan dan bearing belakang. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa efisiensi aktual turbin hanya sebesar 23,39%, jauh di bawah rentang efisiensi ideal industri yaitu antara 45% hingga 60%. Di sisi lain, hasil pengukuran vibrasi menunjukkan nilai yang relatif tinggi, khususnya pada arah aksial dan pada bearing belakang, yang berpotensi menimbulkan ketidakstabilan operasional jika tidak segera ditangani. Dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa rendahnya efisiensi turbin berbanding lurus dengan kondisi vibrasi yang tidak ideal. Ini menunjukkan adanya keterkaitan erat antara karakteristik getaran mesin dengan kemampuan turbin dalam mengkonversi energi secara efisien. Tingkat vibrasi memiliki pengaruh signifikan terhadap performa operasional turbin uap dan setiap kenaikan vibrasi 1 mm/s akan menurunkan daya sebesar 0.4437 MW. Dari hasil, pemantauan vibrasi secara rutin dan sistematis, serta meninjau ulang prosedur pemeliharaan dan operasi guna mengurangi kerugian energi, meningkatkan umur pakai turbin, dan menjaga kontinuitas proses produksi.

Kata kunci :Turbin uap, Efisiensi turbin, Getaran turbin, Pabrik kelapa sawit, Vibrasimeter

ABSTRACT

Steam turbines are one of the vital components in the energy generation system of palm oil mills, functioning to convert the thermal energy of steam into mechanical energy through the process of expansion. The efficiency of a steam turbine plays a crucial role in determining the level of energy conversion optimization in the generation system. However, in practice, turbines do not always operate under ideal conditions. Efficiency degradation often occurs due to various factors, one of which is excessive vibration in rotating components. The collected data includes steam mass flow rate, inlet and outlet enthalpy, as well as the actual output power of the turbine. Vibration measurements were carried out at two main points, namely the front bearing and the rear bearing. The calculation results show that the actual efficiency of the turbine is only 23.39%, which is far below the ideal industry efficiency range of 45% to 60%. On the other hand, vibration measurement results indicate relatively high values, especially in the axial direction and at the rear bearing, which could potentially cause operational instability if not addressed immediately. From the analysis results, it can be concluded that the low turbine efficiency is directly proportional to non-ideal vibration conditions. This shows a strong correlation between machine vibration characteristics and the turbine's ability to efficiently convert energy. Vibration levels have a significant influence on the operational performance of steam turbines, and each increase of 1 mm/s in vibration leads to a reduction of 0.4437 MW in power output. Therefore, routine and systematic vibration monitoring, as well as a review of maintenance and operational procedures, are necessary to reduce energy losses, extend turbine service life, and ensure the continuity of the production process.

Keyword : Steam turbine, Turbine efficiency, Turbine vibration, Palm oil mill, Vibration meter

KATA PENGANTAR

Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala puji dan syukur kami panjatkan kepada Allah SWT, yang telah menetapkan segala sesuatu dengan sempurna, sehingga tiada sehelai daun pun yang jatuh tanpa izin-Nya. Alhamdulillah, atas rahmat dan petunjuk-Nya, penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul “ANALISIS PENGARUH VIBRASI TERHADAP KINERJA TURBIN UAP” sebagai salah satu syarat untuk meraih gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Medan.

Dalam kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan, baik secara langsung maupun tidak langsung, selama proses penyusunan skripsi ini. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Bapak Dr. Agussani, M.A.P, selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
2. Bapak Munawar Alfansury Siregar, S.T., M.T, selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Dr. Ade Faisal, M.Sc., Ph.D, selaku Wakil Dekan I Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Bapak Affandi, S.T., M.T, selaku Wakil Dekan III Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Bapak Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T, selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Ibu Elvy Sahnur, S.T., M.Pd, selaku Sekretaris Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
7. Ibu Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd, yang dengan sabar telah membimbing, mengarahkan, dan memberikan masukan berharga selama proses penyusunan tugas akhir ini.

8. Seluruh Bapak/Ibu Dosen Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, atas ilmu yang sangat bermanfaat selama masa perkuliahan.
9. Ayahanda Legino, Ibunda Sri Awan, Terima kasih atas doa, nasihat, dan kasih sayang yang tiada habisnya.
10. Teman-teman Teknik Elektro, yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan bantuan selama proses penyusunan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka terhadap kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan di masa mendatang. Harapan penulis, semoga laporan ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang teknik elektro, dan menjadi kontribusi kecil bagi perkembangan dunia teknik.

Medan,.....

Surya Dharma

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	5
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Gambaran Umum Turbin Uap.....	6
2.2 Prinsip Kerja Turbin Uap	8
2.3 Klasifikasi Turbin Uap.....	9
2.4 Bagian Utama Turbin UAP	10
2.5 Instrumental Turbin UAP	22
2.6 Pengawasan dan Diagnosa Kondisi Mesin.....	26
2.7 <i>Predictive Maintenance</i>	28
2.8 Manfaat dan Tujuan <i>Predictive Maintenance</i>	29
2.8.1 Analisa Vibrasi	31
2.9 Pengertian Vibrasi	32
2.10 Klasifikasi Getaran	36
2.11 Parameter Getaran	38
2.12 Getaran dan Kondisi Mesin.....	39
2.13 Klasifikasi Pengukuran Getaran.....	40

2.14 Pengertian Vibrasimeter	42
2.14.1 Prinsip Kerja Vibrasimeter	43
2.14.2 Jenis Sensor Getaran dalam Vibrasimeter	43
2.14.3 Parameter Vibrasi yang Diukur	44
2.14.4 Fungsi dan Manfaat Vibrasimeter dalam Industri	44
2.14.5 Standar Pengukuran Vibrasi	44
2.14.7 Perkembangan Teknologi Vibrasimeter	46
2.14.8 Aplikasi Vibrasimeter pada Turbin Uap.....	46
2.14.9 Integrasi Vibrasimeter dengan Sistem Monitoring Modern	46
2.15.10 Korelasi Pearson	48
2.16 Efisiensi Turbin Uap	48
2.16.1 Standar Efisiensi Ideal Industri.....	48
2.16.2 Relevansi Standar Efisiensi dengan Penelitian.....	48
2.16.3 Daya Teoritis (Ideal).....	49
2.16.4 Efisiensi Turbin (η).....	49
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	49
3.1. Tempat Dan Waktu	49
3.1.1 Tempat	49
3.1.2 Waktu.....	49
3.2 Tahap Identifikasi.....	50
3.3 Pengumpulan data dan Analisa	50
3.4 Flowchart.....	52
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	55
4.1 Lokasi dan Objek Penelitian	55
4.2 Analisis Statistik: Regresi Linier Sederhana.....	55
4.3 Data Vibrasi Turbine	56
4.4 Data Keluaran Daya Listrik.....	60
4.5 Analisis Hubungan Vibrasi terhadap Daya Keluaran	62
4.5.1 Persamaan Regresi Linier:.....	62
4.5.2 Koefisien Korelasi (r)	64
4.5.3 Interpretasi Hasil.....	64
4.6 Perhitungan Efisiensi Turbin.....	65

4.6.1 Parameter Operasional Turbin.....	65
4.6.2 Data Diketahui:.....	66
4.6.3 Analisis dan Evaluasi Hasil	67
4.6.4 Faktor-Faktor Penyebab Efisiensi Rendah	68
4.6.5 Dampak Efisiensi Rendah terhadap Sistem.....	69
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	70
5.1 Kesimpulan.....	70
5.2 Saran.....	70
DAFTAR PUSTAKA	72
LAMPIRAN	74
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Bagian Utama Turbin UAP (Situmorang et al., 2023).....	7
Gambar 2. 2 Casing Turbin.....	10
Gambar 2.3 Rotor dan Wheel	11
Gambar 2.4 Carbon ring dan Spring	12
Gambar 2.5 Spacer Carbon ring.....	12
Gambar 2. 6 Journal Bearing	13
Gambar 2. 7 Thrust Bearing(Adibrata Unggul Jaya).....	13
Gambar 2. 8 Baffle Oil.....	14
Gambar 2. 9 Nozzle.....	15
Gambar 2. 10 Guide Ring	15
Gambar 2. 11 Lay Shaft(Adibrata Unggul Jaya)	16
Gambar 2. 12 Coupling	16
Gambar 2. 13 Safety valve turbin	17
Gambar 2. 14 Steam Chest	17
Gambar 2.15 Governor.....	18
Gambar 2. 16 Stem Valve	19
Gambar 2.17 Steam Strainer(Adibrata Unggul Jaya)	20
Gambar 2. 18 Elektrik Oil Pump	21
Gambar 2. 19 Kategori Instrumentasi Turbin Uap(Iswahyudi, 2020)	22
Gambar 2.20 Eksentrilitas	23
Gambar 2.21 Peletakan Sensor Vibrasi (Waskito & Hasibuan, 2016)	24
Gambar 2.22 kurva bathup untuk umur suatu mesin	27
Gambar 2.23 Skema Teknik Monitoring Getaran Mesin.....	28
Gambar 2.24 Proses analisa vibrasi	32
Gambar 2. 25 Sistem getaran pada sebuah pegas (Erapabrianto et al., 2019)	33
Gambar 2. 26 Fungsi Periodik (Fakhrur et al., n.d.)	34
Gambar 2.27 Hubungan antara frekuensi linier, frekuensi sudut, dan kecepatan putar.....	34
Gambar 2. 28 Fungsi harmonik sederhana.....	35
Gambar 2.29 Hubungan antara simpangan, kecepatan dan percepatan dalam gerak harmonik sederhana (Fakhrur et al., n.d.)	35
Gambar 2.30 Model Getaran Bebas Tak Tereadam.....	37
Gambar 2.31 Getaran bebas tak tereadam (Rizky & Wibawaputra, 2024)	37
Gambar 2.32 Frekuensi Getaran (Isranuri et al., 2019).....	38
Gambar 2. 33 Alat Ukur Vibrasimeter	42
Gambar 2. 34 Standar Vibrasi ISO	45
Gambar 3. 1 Vibrasi Meter	50
Gambar 3. 2 Letak Pengukuran Vibrasi	51
Gambar 3.4 Sketsa Letak Vibrasi Meter	51

Gambar 4. 1 pengukuran Vibrasi Bearing 1 jam 10.00.....	56
Gambar 4. 2 pengukuran Vibrasi Bearing 2 jam 10.00.....	56
Gambar 4. 3 Keluaran Daya Listrik Turbin jam 10.00	56
Gambar 4. 4 Pengukuran Vibrasi Bearing 1 jam 14.00	57
Gambar 4. 5 Pengukuran Vibrasi Bearing 2 jam 14.00	57
Gambar 4. 6 Keluaran Daya Listrik Turbin jam 14.00	58
Gambar 4. 7 Pengukuran Vibrasi Bearing 1 jam 20.00	58
Gambar 4. 8 Pengukuran Vibrasi Bearing 2 jam 20.00	59
Gambar 4. 9 Keluaran Daya Listrik Turbin jam 20.00	59
Gambar 4. 10 Grafik Persamaan Regresi Linier	63

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Waktu Penelitian	49
Tabel 4. 1 Data Vibrasi	60
Tabel 4. 2 Data Keluaran Daya listrik Turbin.....	60
Tabel 4. 3 Tabel Data Statistik.....	62
Tabel 4. 4 Parameter Operasional Turbin	65
Tabel 4. 5 Perbandingan dengan Standar Industri	67
Tabel 4. 6 Penyebab Efisiensi Rendah.....	68

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi di bidang industri memberikan pengaruh yang luas pada kegiatan produksi di industri. Penggunaan teknologi yang canggih merupakan kebutuhan dalam mencapai produk yang berkualitas, sehingga perawatan terhadap peralatan (instrumen) di industri wajib untuk dilakukan. Salah satu metode perawatan yang diterapkan di industri yang dilakukan adalah dengan mendeteksi dan mendiagnosis kerusakan pada peralatan, sehingga kondisi peralatan dapat terpantau dengan baik. Biasanya kegiatan perawatan pada mesin-mesin berputar (rotating machine) dilakukan dengan menganalisa frekuensi getarannya, sehingga dapat diketahui jenis kerusakannya. Tetapi cara tersebut masih memiliki kelemahan yaitu kurang spesifiknya frekuensi yang didapat untuk setiap jenis kerusakan.

Para ahli yang mendesain dan menggunakan system diagnosis biasanya memiliki latar belakang pengalaman dalam menganalisa mesin dinamis dan getaran. Ketika suatu mekanisme berkerja dalam suatu mesin, maka getaran akan terjadi dengan sendirinya. Getaran ini akan mentransmisikan melewati mesin dan akan menciptakan suatu getaran pada permukaan luar mesin, hal ini mengakibatkan mesin tersebut meradiasikan suara. Perawatan berbasis kondisi mesin (CBM : Condition Based Maintenance) adalah merupakan metode perawatan dengan memantau kondisi mesin berdasarkan pemantauan beragam obyek ukur pada mesin yang sedang beroperasi tersebut. Salah satu metode perawatan yang termasuk dalam kelompok CBM adalah Predictive Maintenance berbasis pemantauan sinyal getaran. Sesuai dengan namanya, maka pada kegiatan predictive maintenance dilakukan kegiatan analisis dan diagnosis untuk prediksi kapan level getaran pada mesin yang sedang beroperasi akan melewati batas alarm serta informasi kemungkinan adanya cacat pada elemen rotasi yang menjadi sumber getarannya. Pada turbin sering ditemui kasus vibrasi yang melebihi dari batas standart yang telah ditentukan, dan terkadang malah akan menyebabkan unit menjadi trip. Untuk itu harus dicari penyebab kerusakan yang berpotensi menyebabkan tingginya level vibrasi yang dalam hal ini ditunjukkan dengan nilai amplitudo yang sangat tinggi.

Dalam sistem pembangkitan tenaga listrik skala besar, keberadaan turbin uap menjadi sangat vital. Turbin uap merupakan mesin konversi energi yang bekerja berdasarkan prinsip termodinamika siklus Rankine, di mana energi termal dari uap bertekanan dan bersuhu tinggi diubah menjadi energi mekanik rotasi. Energi mekanik inilah yang kemudian digunakan untuk memutar poros generator guna menghasilkan listrik. Efisiensi dari proses konversi energi ini sangat bergantung pada kondisi dan performa dari turbin uap itu sendiri. Maka dari itu, pengawasan terhadap kondisi turbin, baik dari sisi termal maupun mekanis, menjadi bagian yang tak terpisahkan dari manajemen pembangkit.

Salah satu tantangan utama dalam pengoperasian turbin uap adalah vibrasi atau getaran mekanis. Vibrasi merupakan fenomena osilasi dari suatu komponen terhadap titik keseimbangannya, yang dalam dunia teknik dapat disebabkan oleh berbagai faktor seperti gaya dinamis, ketidakseimbangan massa, gaya gesekan, maupun interaksi fluida. Meskipun vibrasi dalam batas tertentu merupakan bagian normal dari sistem berputar, tetapi bila nilainya melebihi ambang batas yang ditentukan, vibrasi dapat menjadi indikator awal dari kondisi tidak normal atau kegagalan mekanis.

Pada turbin uap, vibrasi dapat muncul di berbagai titik, seperti rotor, shaft, bearing (bantalan), seal, dan komponen pendukung lainnya. Arah vibrasi juga sangat menentukan:

1. Arah horizontal dan vertikal sering kali mengindikasikan ketidakseimbangan atau pelurusan poros yang tidak sempurna.
2. Arah aksial sering berhubungan langsung dengan thrust bearing dan menunjukkan tekanan longitudinal yang berlebihan.

Nilai vibrasi yang tinggi dan tidak stabil merupakan gejala dari adanya kerusakan atau ketidaksesuaian pada sistem, seperti:

1. Rotor unbalance akibat distribusi massa tidak merata,
2. Shaft misalignment karena pemasangan komponen tidak lurus,
3. Loose components akibat pelonggaran baut, bantalan, atau struktur pendukung,
4. Bearing wear yang menghasilkan frekuensi vibrasi spesifik akibat keausan,
5. Steam force imbalance dari distribusi aliran uap yang tidak merata.

Getaran yang tidak dikendalikan dengan baik dapat menyebabkan penurunan efisiensi kerja turbin, peningkatan suhu lokal pada bearing, gesekan yang tidak normal, hingga keausan komponen yang lebih cepat dari umur desainnya. Dalam kasus ekstrim, vibrasi berlebih bisa menyebabkan shaft failure (patah poros), kerusakan struktur, hingga kecelakaan fatal jika tidak dideteksi sejak dini.

Selain dampaknya terhadap keandalan mekanis, vibrasi juga memberikan pengaruh langsung terhadap performa daya listrik yang dihasilkan oleh pembangkit. Vibrasi menyebabkan energi rotasi menjadi tidak stabil, sehingga berdampak pada kestabilan frekuensi dan tegangan listrik. Di sisi lain, vibrasi menambah beban dinamis pada poros dan menyebabkan rugi-rugi mekanis tambahan yang membuat daya keluaran tidak maksimal. Dalam sistem pembangkit yang terhubung ke jaringan interkoneksi, kestabilan daya menjadi aspek krusial, karena fluktuasi tegangan atau frekuensi bisa menyebabkan gangguan sistem secara menyeluruh (blackout).

Ironisnya, meskipun potensi kerugian akibat vibrasi cukup besar, sistem pemantauan vibrasi di banyak PLTU di Indonesia masih tergolong konvensional. Beberapa unit pembangkit hanya melakukan pengukuran vibrasi saat jadwal inspeksi rutin. Hal ini menyebabkan adanya jeda waktu antara terjadinya anomali dan tindakan perbaikan. Dalam banyak kasus, kerusakan pada bearing atau poros baru diketahui setelah vibrasi sudah memasuki kategori parah dan memaksa unit dihentikan secara paksa.

Dalam konteks ini, analisis terhadap pengaruh vibrasi terhadap kinerja turbin uap menjadi sangat relevan. Data vibrasi yang diperoleh dari pengukuran pada berbagai arah dan titik (bearing depan dan belakang, casing, atau poros) dapat dianalisis untuk mengidentifikasi pola getaran dan jenis gangguan yang mungkin terjadi. Dengan menghubungkan data vibrasi tersebut dengan data keluaran daya listrik, dapat diketahui bagaimana peningkatan vibrasi memengaruhi efisiensi dan kinerja pembangkit secara langsung.

Analisis ini tidak hanya berguna untuk mendeteksi kerusakan secara dini (*early warning system*), tetapi juga sebagai dasar untuk pengambilan keputusan dalam strategi pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*). Dibandingkan metode *corrective maintenance* (perbaikan setelah rusak) atau *preventive*

maintenance (berdasarkan jadwal), pendekatan berbasis kondisi aktual jauh lebih efisien dan ekonomis.

Adapun standar internasional seperti ISO 10816-3 telah mengklasifikasikan tingkat vibrasi mesin berputar berdasarkan besarnya amplitudo getaran. Misalnya, untuk mesin turbin besar dengan fondasi kaku, getaran melebihi 4.5 mm/s sudah tergolong “severe”, artinya berisiko tinggi terhadap kerusakan dan harus segera dilakukan tindakan korektif. Sayangnya, banyak PLTU yang belum mengadopsi standar ini secara disiplin, sehingga data vibrasi yang tersedia sering tidak digunakan secara optimal.

Di samping aspek teknis, ada pula alasan ekonomis dan strategis yang menjadikan analisis vibrasi ini penting. Gangguan pada turbin akibat vibrasi tidak hanya menurunkan daya, tetapi juga berdampak pada ketersediaan pasokan listrik ke masyarakat dan industri. Setiap jam kerusakan bisa menimbulkan kerugian produksi, gangguan sistem distribusi, hingga pencemaran akibat pembakaran bahan bakar yang tidak efisien. Oleh karena itu, menjaga kinerja turbin tetap optimal melalui pengawasan vibrasi bukan hanya kewajiban teknis, tetapi juga tanggung jawab operasional dan lingkungan.

Melalui penelitian ini, dilakukan analisis terhadap data vibrasi pada tiga arah utama (horizontal, vertikal, dan aksial) dengan titik pengukuran pada bearing depan dan belakang turbin uap. Hasil pengukuran vibrasi tersebut kemudian dikorelasikan dengan data keluaran daya listrik pada kondisi operasi aktual. Analisis ini diharapkan dapat memberikan informasi teknis mengenai:

1. Seberapa besar pengaruh peningkatan vibrasi terhadap penurunan daya listrik,
2. Arah vibrasi mana yang paling berdampak terhadap performa turbin,
3. Komponen mana yang paling rentan terhadap kerusakan akibat vibrasi,
4. Serta saran perbaikan dan strategi monitoring yang dapat diimplementasikan.

Dengan pemahaman yang lebih mendalam tentang perilaku vibrasi pada turbin uap, maka pengelolaan operasi dan pemeliharaan sistem pembangkit dapat dilakukan secara lebih efisien, andal, dan berbasis data

Untuk itu maka penulis mengangkat judul “ANALISIS PENGARUH VIBRASI TERHADAP KINERJA TURBIN UAP” untuk menganalisis permasalahan tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang diambil pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh vibrasi terhadap daya listrik yang dihasilkan pada turbin uap?
2. Bagaimana pengaruh vibrasi terhadap Efisiensi kinerja pada turbin uap?

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Adapun batasan masalah pada penelitian ini agar penelitian dapat terfokus pada rumusan adalah sebagai berikut :

1. Membahas pengaruh vibrasi turbin uap terhadap daya listrik yang di hasilkan menggunakan perhitungan Regresi Linier sederhana.
2. Membahas pengaruh vibrasi terhadap Efisiensi kinerja turbin uap.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian sebagai berikut :

1. Menganalisis pengaruh vibrasi turbin uap daya listrik yang di hasilkan menggunakan perhitungan Regresi Linier Sederhana.
2. Menganalisis pengaruh vibrasi terhadap Efisiensi kinerja pada turbin uap

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian yang akan dilakukan ini adalah terdapat beberapa poin sebagai berikut :

1. Menambah wawasan penulis terhadap pengaruh vibrasi terhadap kinerja pada turbin uap.
2. Memberikan solusi pada target penelitian tentang hasil penelitian yang didapat terkait pengaruh vibrasi terhadap Efisiensi dan daya listrik turbin uap.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

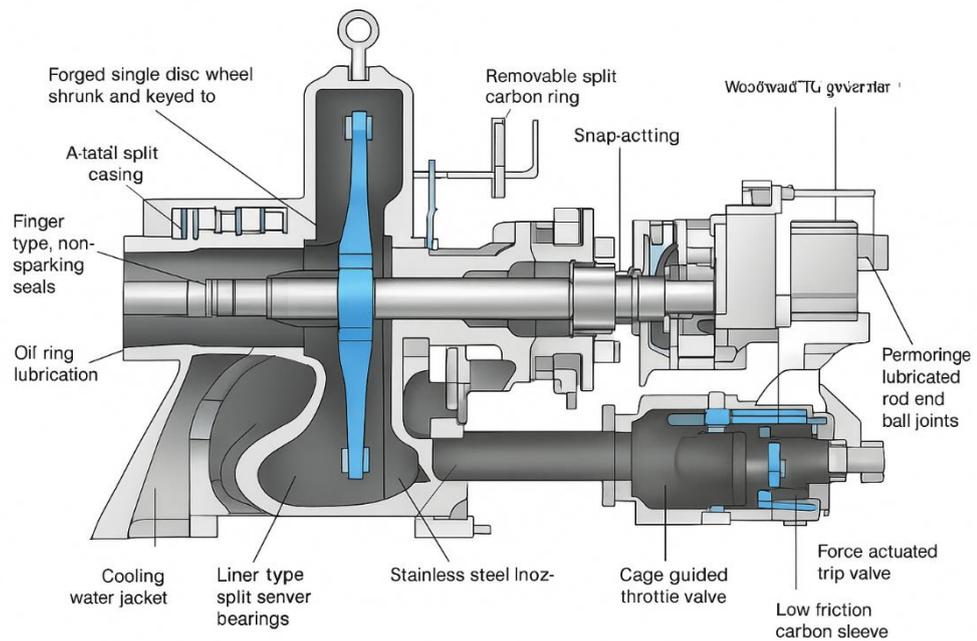
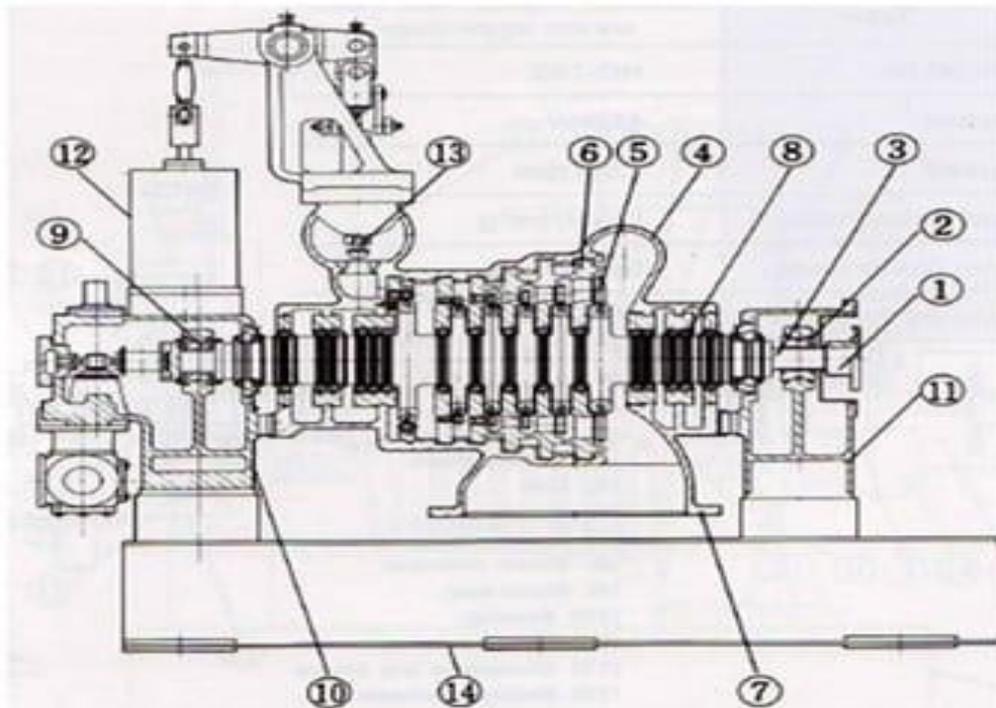
2.1 Gambaran Umum Turbin Uap

Turbin uap adalah suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik dan energi kinetik ini selanjutnya diubah menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin, langsung atau dengan bantuan roda gigi reduksi, dihubungkan dengan mekanisme yang digerakkan. Tergantung pada jenis mekanisme yang digerakkan, turbin uap dapat digunakan pada berbagai bidang industri, untuk pembangkit listrik, dan transportasi. (Situmorang et al., 2023)

Dalam sistem pembangkit tenaga berbasis uap, turbin merupakan komponen yang sangat vital karena berfungsi mengubah energi termal dari uap menjadi energi mekanis pada poros, yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik melalui generator. Agar dapat bekerja dengan baik, turbin uap harus berputar pada kondisi yang stabil dengan getaran seminimal mungkin. Namun, pada praktiknya, selalu terdapat vibrasi atau getaran yang muncul akibat interaksi antara komponen mekanis dan aliran fluida kerja.

Vibrasi pada turbin uap dapat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja maupun keandalan mesin. Getaran yang terjadi pada tingkat rendah dan masih dalam batas standar umumnya tidak berbahaya, bahkan dapat menjadi indikator normal dari kondisi operasi. Akan tetapi, apabila nilai vibrasi meningkat dan melebihi standar yang ditetapkan, maka kondisi ini dapat menimbulkan berbagai permasalahan serius.

Salah satu pengaruh utama vibrasi adalah penurunan efisiensi kerja turbin. Energi yang seharusnya dikonversi menjadi tenaga mekanis justru hilang dalam bentuk osilasi mekanik dan panas akibat gesekan. Hal ini menyebabkan daya yang dihasilkan turbin lebih rendah dibandingkan dengan kondisi idealnya. Selain itu, vibrasi berlebih dapat mempercepat kerusakan mekanis pada komponen penting, seperti bearing, rotor, dan sudu turbin. Jika getaran berlangsung dalam jangka panjang, kerusakan yang ditimbulkan bisa bersifat permanen dan membutuhkan biaya perbaikan yang sangat besar.



Gambar 2.1 Bagian Utama Turbin UAP
(Situmorang et al., 2023)

2.2 Prinsip Kerja Turbin Uap

Turbin uap bekerja berdasarkan prinsip siklus Rankine, yaitu suatu siklus termodinamika ideal yang menggambarkan proses konversi panas menjadi kerja melalui media kerja berupa uap air. Proses kerja turbin uap secara umum terdiri dari beberapa tahapan sebagai berikut.

a. Pemanasan Air (Proses Isobarik di Boiler)

Air yang telah dipompa dimasukkan ke dalam boiler, di mana energi panas dari pembakaran bahan bakar digunakan untuk memanaskan air hingga menjadi uap jenuh atau uap super panas (superheated steam).

b. Ekspansi Uap di Turbin (Proses Isentropik)

Uap yang bertekanan dan bersuhu tinggi diarahkan ke sudu-sudu turbin melalui nosel, di mana terjadi ekspansi dan percepatan aliran uap. Energi kinetik dari uap akan diterima oleh sudu turbin sehingga menyebabkan rotor berputar.

c. Kondensasi Uap (Proses Isobarik di Kondensor)

Setelah keluar dari turbin, uap kehilangan energi dan berubah menjadi uap tekanan rendah. Uap ini kemudian dikondensasikan kembali menjadi air cair di dalam kondensor.

d. Pembakaran Limbah Sawit di Boiler

Fiber dan shell dibakar dalam boiler untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi.

e. Uap Masuk ke Turbin

Uap dialirkan ke turbin untuk memutar rotor melalui nosel dan sudu, menghasilkan energi mekanik.

f. Penggerakan Generator atau Peralatan

Rotor turbin dihubungkan ke generator atau ke sistem transmisi untuk menggerakkan peralatan produksi.

g. Pemanfaatan Uap Buang

Uap bekas dari turbin digunakan untuk proses pemanasan atau dibuang ke kondensor/kondensat tank.

2.3 Klasifikasi Turbin Uap

Turbin uap dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa aspek teknis:

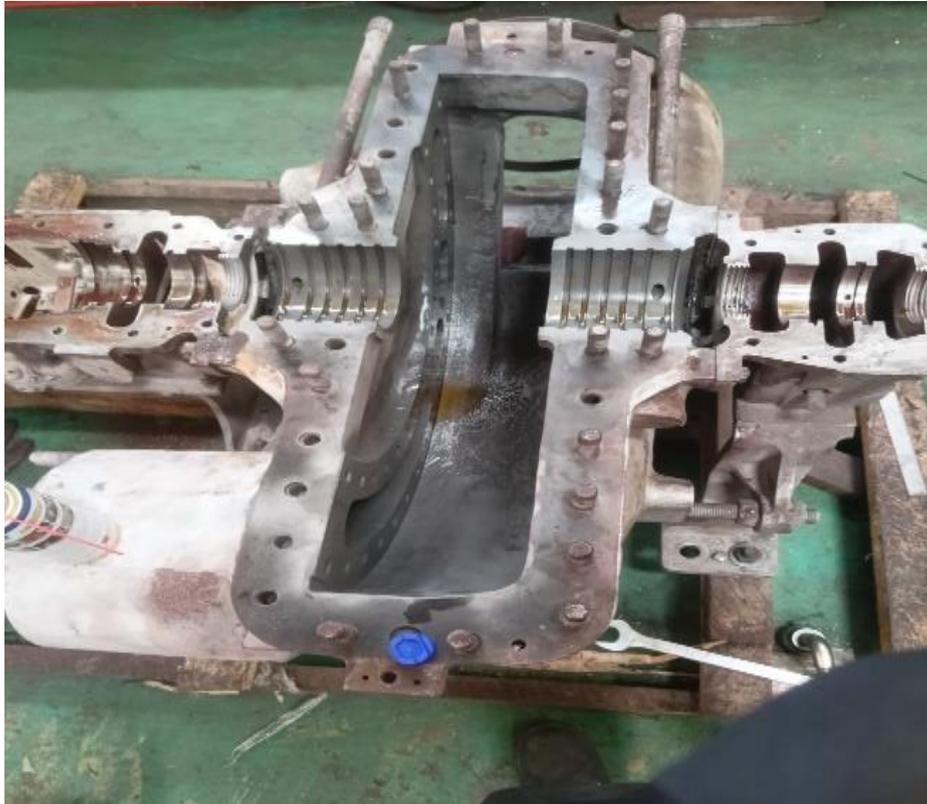
- a. Berdasarkan arah aliran uap
 - a) Turbin Aksial: Uap mengalir sejajar dengan poros turbin.
 - b) Turbin Radial: Uap mengalir tegak lurus terhadap poros.
 - c) Turbin Tangensial: Uap mengalir menyentuh sudu secara tangensial.
- b. Berdasarkan cara konversi energi
 - a) Turbin Impuls: Uap dipercepat di nosel dan energi kinetik langsung diberikan ke sudu-sudu tanpa perubahan tekanan yang signifikan di sudu.
 - b) Turbin Reaksi: Perubahan tekanan dan kecepatan terjadi secara bertahap baik di nosel maupun sudu turbin.
- c. Berdasarkan tekanan dan pemanfaatannya
 - a) Turbin Kondensasi: Menghasilkan energi maksimum dengan membuang uap ke dalam kondensor pada tekanan rendah.
 - b) Turbin Back Pressure (non-kondensasi): Uap buang masih memiliki tekanan dan digunakan untuk proses industri (co-generation).
 - c) Turbin Ekstraksi: Mengambil sebagian uap dari bagian tengah turbin untuk keperluan industri atau pemanasan.
 - d) Jenis Turbin Uap yang Digunakan di Pabrik Kelapa Sawit biasanya digunakan turbin dengan spesifikasi sebagai berikut:
 - Tipe Impuls atau reaksi satu tahap
 - Tekanan uap masuk $\pm 20 - 30$ bar
 - Temperatur uap $\pm 300 - 350^{\circ}\text{C}$
 - Putaran $\pm 6.000 - 12.000$ rpm (dengan gearbox untuk menurunkan ke kecepatan generator)
 - e) Karena kebutuhan daya tidak sebesar PLTU, desain turbin relatif lebih sederhana dan ekonomis.

2.4 Bagian Utama Turbin UAP

Turbin uap merupakan mesin konversi energi yang mengubah energi termal dari uap air menjadi energi mekanik melalui proses ekspansi uap yang diarahkan ke sudu-sudu turbin. Untuk menjalankan fungsinya dengan baik, turbin uap terdiri dari beberapa bagian utama yang saling bekerja sama.

1. Casing

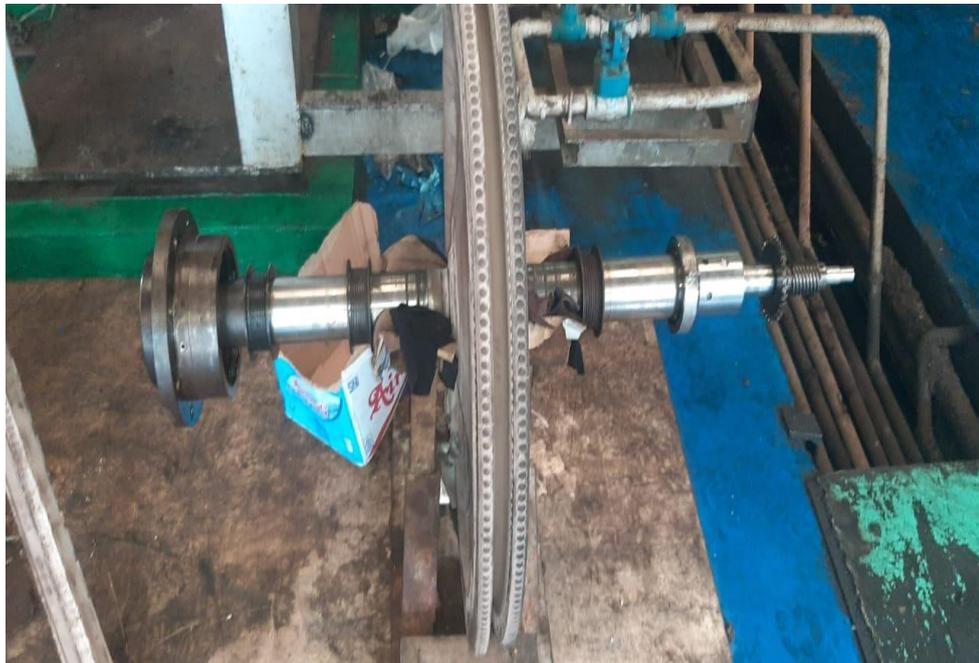
Casing turbin merupakan cover turbin yang berfungsi untuk membungkus sudu-sudu dan tempat dudukan komponen-komponen turbin dan merupakan bagian yang diam merupakan rumah atau wadah dari rotor. Pada casing terdapat sudu-sudu diam (disebut stator) yang dipasang melingkar dan berjajar terdiri dari beberapa baris yang merupakan pasangan dari sudu gerak pada rotor. Sudu diam berfungsi untuk mengarahkan aliran uap agar tepat dalam mendorong sudu gerak pada rotor. (Situmorang et al., 2023)



Gambar 2. 2 Casing Turbin
(Adibrata Unggul Jaya)

2. Rotor dan Wheel

Rotor adalah bagian yang berputar terdiri dari poros dan sudu-sudu gerak yang terpasang mengelilingi rotor. Jumlah baris sudu gerak pada rotor sama dengan jumlah baris sudu diam pada casing. Pasangan antara sudu diam dan sudu gerak disebut tingkat (stage). Sudu gerak (rotor) berfungsi untuk mengubah energi kinetik uap menjadi energi mekanik, bagian turbin yang berputar yang terdiri dari poros, sudu turbin atau deretan sudu turbin yaitu *Stationary Blade* dan *Moving Blade*. Untuk turbin bertekanan tinggi atau berukuran besar, khususnya untuk turbin jenis reaksi maka motor ini perlu di *Balance* untuk mengimbangi gaya reaksi yang timbul secara aksial terhadap poros.



Gambar 2.3 Rotor dan Wheel
(Adibrata Unggul Jaya)

3. Carbon ring dan Spring

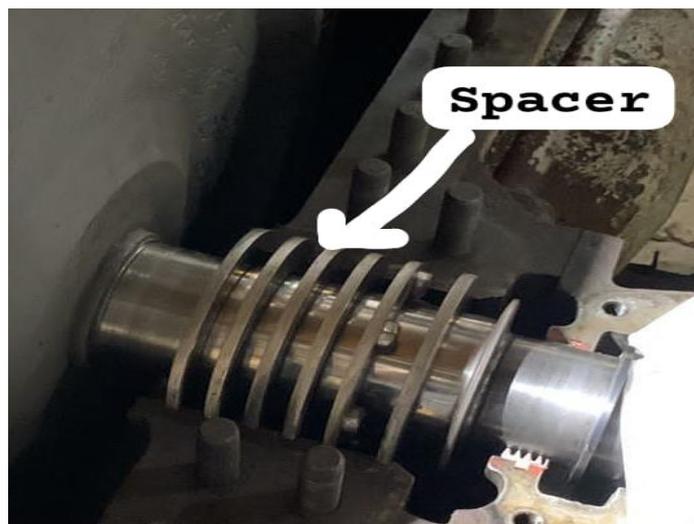
Carbon ring dan *spring* merupakan salah satu bagian turbin yang terletak antara poros dengan *casing* yang berfungsi untuk mencegah uap air keluar dari dalam turbin melewati sela-sela antara poros dengan *casing* akibat perbedaan tekanan.



Gambar 2.4 *Carbon ring* dan *Spring*
(Adibrata Unggul Jaya)

4. *Spacer carbon ring*

Spacer merupakan komponen stator dari turbin uap yang berfungsi untuk menahan carbon ring agar tidak bergeser sehingga membuat steam dapat keluar melalui celah-celah carbon tersebut.



Gambar 2.5 *Spacer Carbon ring*
(Adibrata Unggul Jaya)

5. Turbine bearings

Bearing/bantalan pada turbin uap memiliki fungsi sebagai berikut :

- a. Menahan berat dari rotor.
- b. Menahan berbagai gaya tidak stabil dari uapair terhadap sudu turbin.
- c. Menahan ketidakseimbangan karena kerusakan sudu.
- d. Menahan gaya aksial pada beban listrik yang bervariasi.

Jenis-jenis bearing

a) *Journal Bearing*

Merupakan salah satu komponen turbin yang berfungsi sebagai bantalan untuk menumpu poros rotor.



Gambar 2. 6 *Journal Bearing*
(Adibrata Unggul Jaya)

b) *Thrust Bearing*

Thrust bearing adalah jenis bantalan (bearing) yang dirancang khusus untuk menahan gaya aksial (thrust load). Dalam sistem turbin uap atau mesin berputar lainnya, thrust bearing sangat penting karena berfungsi untuk menjaga posisi poros tetap stabil secara aksial, terutama saat terjadi dorongan dari aliran uap atau beban kerja.



Gambar 2. 7 *Thrust Bearing*(Adibrata
Unggul Jaya)

e. Pelumasan bearing turbin

Pelumasan bearing turbin adalah proses memberikan oli pelumas secara terus-menerus pada bantalan (bearing) turbin untuk mengurangi gesekan, mendinginkan komponen, dan mencegah keausan. Pelumasan sangat penting untuk menjamin keandalan dan umur panjang dari turbin uap atau gas dibutuhkan sebuah sistem pelumasan menggunakan oli, yang secara terus menerus disirkulasi dan didinginkan untuk melumasi bearing yang terus mengalami pergesekan pada saat turbin uap beroperasi normal.

Table 2.1 Batas Suhu Bearing

	<i>Metal Temperature Spring Load Arrangement</i>	<i>Metal Temperature Embedded Arrangement</i>	<i>Oil Temperature at oil return line</i>
	F / C	F / C	F / C
<i>Maksimu Operating</i>	176/ 80.0	220/104.0	180/820
<i>Alarm</i>	185/ 85.0	230/ 110.0	185/850
<i>Shutdown</i>	203/ 95.0	240/ 116.0	195/905

6. *Baffle Oil*

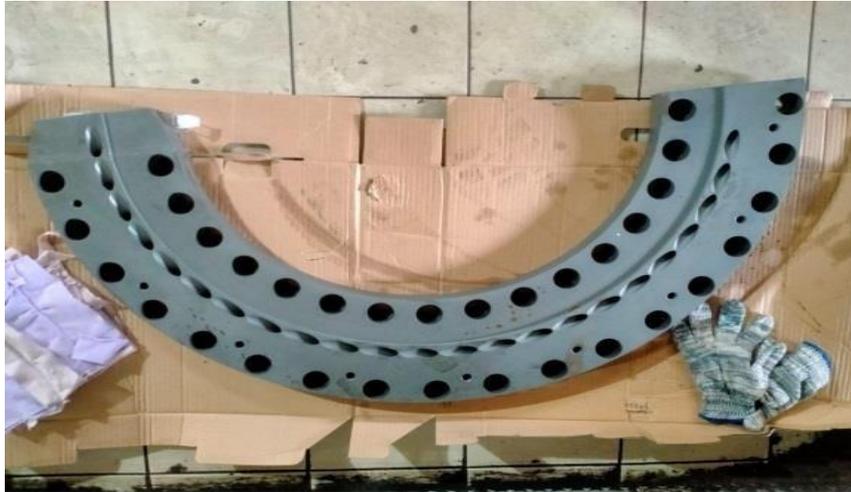
Baffle Oil merupakan komponen turbin uap yang berfungsi untuk mencegah keluarnya oli ketika *rotor wheel* berputar.



Gambar 2. 8 *Baffle Oil*
(Adibrata Unggul Jaya)

7. *Nozzle*

Nozzle Merupakan Untuk menyebarkan dan mengarahkan aliran steam yang masuk ke turbin pada permukaan sudu-sudu tingkat pengaturan putaran turbin.



Gambar 2. 9 *Nozzle*
(Adibrata Unggul Jaya)

8. *Guide Ring*

Untuk memisahkan turbin ke dalam beberapa tingkat tekanan dari turbin tekanan rendah. Selain itu dalam diafragma terdapat nozzle yang berfungsi sebagai sudu pengarah dan meningkatkan lajuuap pada sudu gerak.



Gambar 2. 10 *Guide Ring*
(Adibrata Unggul Jaya)

9. Lay Shaft

Lay Shaft merupakan komponen turbin uap yang berfungsi sebagai perantara pendistribusian putaran turbin uap melalui *governor*.



Gambar 2. 11 *Lay Shaft*(Adibrata Unggul Jaya)

10. Coupling

Coupling adalah komponen yang digunakan untuk menghubungkan kedua poros yaitu poros turbin dan poros *gear box* (*Pinion Gear*) pada ujungnya dengan tujuan untuk mentransmisikan daya mekanis.



Gambar 2. 12 *Coupling*
(Adibrata Unggul Jaya)

11. *Safety valve Turbin*

Safety Valve Turbin merupakan komponen turbin uap yang berfungsi untuk membuang sisa steam agar tekanan/ temperatur steam pada turbin uap selalu konstan.



Gambar 2. 13 *Safety valve turbin*
(Adibrata Unggul Jaya)

12. *Steam Cheast*

Steam Cheast Merupakan komponen turbin uap yang berfungsi untuk menempatkan katup-katup governor sebagai pengatur aliran uap yang akan masuk ke turbin.



Gambar 2. 14 *Steam Cheast*
(Adibrata Unggul Jaya)

13. Governor Control Mekanis

Governor Control Mekanis berupa *Lingkage, Lever, dan Rod End* yang berfungsi sebagai *handle* antara *governor* dengan *steam chest* yang untuk mengatur buka tutupnya *stem valve* dan *Governor Valve (GV)* Turbin harus dapat beroperasi dengan putaran yang konstan (biasanya 4500 rpm) pada beban yang berubah ubah. Untuk membuat agar putaran turbin selalu tetap digunakan *governor valve* yang bertugas mengatur aliran uap masuk turbin sesuai dengan bebannya. Sistem *governor valve* yang digunakan umumnya adalah *mechanic hydraulic (MH)* atau *electro hydraulic (EH)*.

(Situmorang et al., 2023)



Gambar 2.15 *Governor*
(Adibrata Unggul Jaya)

14. *Stem Valve*

Steam valve (katup uap) adalah komponen penting dalam sistem pembangkitan tenaga uap, seperti pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), turbin uap, atau sistem perpipaan industri. Fungsinya adalah untuk mengatur, mengarahkan, dan mengontrol aliran uap dari boiler menuju turbin.

Fungsi Utama Steam Strainer

a. Melindungi peralatan:

Mencegah kerusakan pada katup, turbin, dan peralatan lain akibat partikel asing seperti karat, kerak, atau serpihan logam.

b. Menjaga efisiensi sistem:

Uap yang bersih mengurangi potensi gangguan aliran dan menjaga performa optimal.

c. Memperpanjang umur sistem:

Mengurangi frekuensi perawatan dan penggantian komponen akibat kontaminasi.



Gambar 2. 16 *Stem Valve*
(Adibrata Unggul Jaya)

15. *Steam Strainer*

Steam strainer (saringan uap) adalah perangkat dalam sistem perpipaan uap yang digunakan untuk menyaring partikel padat, kotoran, atau serpihan dari aliran uap sebelum uap tersebut masuk ke peralatan penting seperti turbin, katup, heat exchanger, atau kontrol valve.

Fungsi Utama Steam Strainer

a. Melindungi peralatan:

Mencegah kerusakan pada katup, turbin, dan peralatan lain akibat partikel asing seperti karat, kerak, atau serpihan logam.

b. Menjaga efisiensi sistem:

Uap yang bersih mengurangi potensi gangguan aliran dan menjaga performa optimal.

c. Memperpanjang umur sistem:

Mengurangi frekuensi perawatan dan penggantian komponen akibat kontaminasi.



Gambar 2.17 *Steam Strainer*(Adibrata Unggul Jaya)

16. Sistem Pelumasan

Turbin tidak boleh diputar tanpa adanya pelumasan sehingga pelumasan bantalan sangatlah penting. Parameter utama dari sistem pelumasan adalah tekanan. Untuk menjamin tekanan minyak pelumas yang konstan disediakan beberapa pompa minyak pelumas :

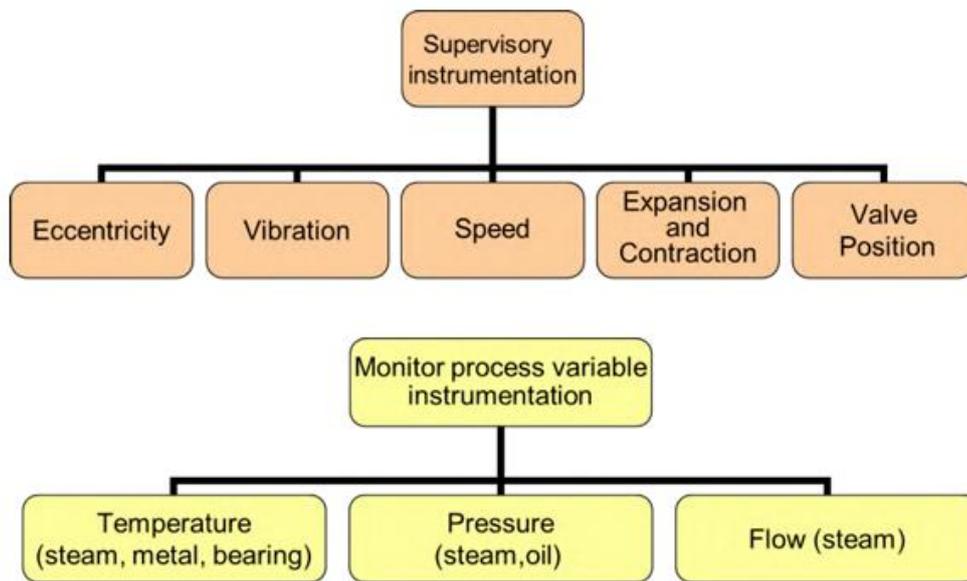
- a. *Main Oil Pump* adalah pompa pelumas utama yang digerakan oleh poros turbin sehingga baru berfungsi ketika putaran turbin mencapai lebih dari 95 %.
- b. *Auxiliary Oil Pump* adalah pompa yang digerakkan dengan motor listrik AC. Pompa ini berfungsi pada start up dan shut down turbin serta sebagai back up bila tekanan minyak pelumas dari MOP turun.
- c. *Emergency Oil Pump* adalah pompa yang digerakkan dengan motor listrik DC dan digunakan sebagai cadangan atau darurat ketika pasok listrik AC hilang. (Situmorang et al., 2023)



Gambar 2. 18 Elektrik Oil Pump
(Situmorang et al., 2023)

2.5 Instrumental Turbin UAP

Fungsi instrumentasi yaitu Memantau dan melakukan pengukuran terhadap kondisi komponen-komponen turbin (baik diam maupun berputar) pada saat beroperasi. Memastikan operasi pada batasan yang aman Memberikan peringatan jika ada ketidak normalan pada waktu turbin beroperasi. Memberikan percepatan bila beroperasi pada putaran kritis dan synchronize Kategori instrumentasi turbin uap: (Iswahyudi, 2020)

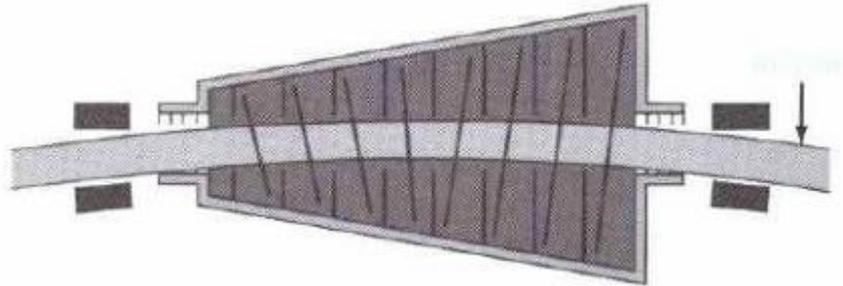


Gambar 2. 19 Kategori Instrumentasi Turbin Uap(Iswahyudi, 2020)

a. Eksentrisitas

Eksentrisiti menunjukkan Bagaimana kelurusan suatu poros turbin. Berapa besar penyimpangan yang terjadi terhadap ukuran sumbu normal selama turbin beroperasi. Eksentrisitas menyebabkan poros bergetar ketika beroperasi. Memberikan informasi sebagai pertimbangan keputusan keadaan aman atau tidak untuk beroperasi. Poros akan mengalami kelendutan ketika prosedur shutdown tidak tepat. Bergetarnya poros dalam bentuk informasi besarnya kelendutan akan ditransmisikan ke recorder. Signal yang diterima, akan menggerakkan pen recorder pada suatu luasan atau bandwidth. Besarnya eksentrisitas ditentukan oleh lebarnya bend yang diekspresikan dalam mils (seperseribu inch). Pada saat startup : Sebelum putaran turbin dilepas oleh turning gear, ukuran eksentrisitas harus lebih rendah dari

batas petunjuk manual yang dikeluarkan oleh manufaktur turbin. Jika uap ditambahkan ke turbin sebelum nilai eksentrisitasnya mencapai batas tertentu maka dapat mengakibatkan turbin bergetar secara berlebihan (Waskito & Hasibuan, 2016)

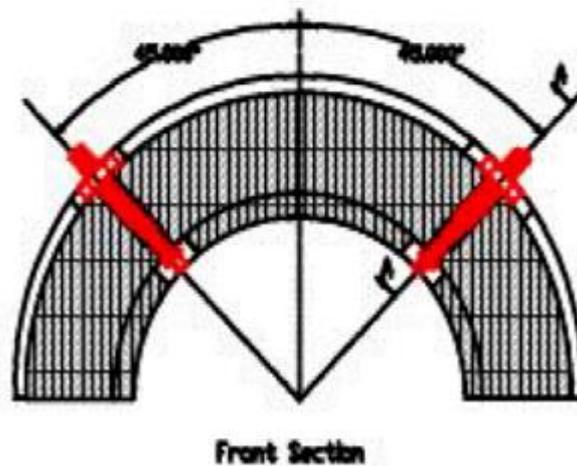


Gambar 2.20 Eksentrilitas

(Waskito & Hasibuan, 2016)

b. Vibrasi

Vibrasi suatu turbin harus dijaga dalam batas tertentu (aman). Jika vibrasi turbin melebihi batas toleransi maka akan terjadi rubbing antara bagian yang berputar dan bagian yang diam. Vibrasi juga menyebabkan kerusakan pada poros, seal dan bearing. Pada umumnya sensor vibrasi ditempatkan pada bearing metal. Sensor ini mengukur besarnya vibrasi dan mengirim signal listrik yang sebanding dengan gerak radial poros. Signal diterima oleh vibrasi recorder yang mengindikasikan nilai penyimpangan radial dalam gerakan poros. Walaupun tiap2 turbin mempunyai batas toleransi yang berbeda, namun nilai vibrasi pada operasi normal umumnya kurang dari 3 mils (seperseribu inch). Intrumen ini mengukur gerakan dinamik (radial vibration) dari poros yang relatif terhadap rumah bearing (bearing housing). Perhitungan ini memberikan indikasi awal terjadinya kerusakan. Pengukuran getaran dapat dibuat horizontal atau vertikal terhadap shaft (X-Y). (Waskito & Hasibuan, 2016)



Gambar 2.21 Peletakan Sensor Vibrasi (Waskito & Hasibuan, 2016)

c. Speed

Instrumen yang digunakan untuk mengukur putaran (speed), acceleration, overspeed poros turbin. Putaran operasi antara satu turbin dan lainnya bervariasi tergantung manufacturer. Putaran selalu dimonitor oleh operator terutama selama turbin roll up/ roll down. Pada saat startup : Misal direkomendasi 1000 rpm untuk periode tertentu, hal ini untuk menyamakan pemuaian akibat perubahan temperatur metal.

d. expansion and Contraction

Pengukuran dilakukan untuk mengontrol ekspansi dan kontraksi pada casing dan rotor turbin. Differential expansion adalah ukuran perbedaan antara kenaikan termal dari rotor dengan kenaikan termal dari case (casing). Turbin shell ditopang pada rail yang dapat bergerak sliding. Ekspansi dan kontraksi casing harus dipantau selama turbin startup dan shutdown secara hati hati.

e. Valve Position

Adalah suatu instrumen yang berfungsi untuk mengendalikan aliran uap yang masuk ke turbin. Banyaknya aliran ditentukan oleh derajat bukaan disk katup (valve position). Kecepatan turbin ditentukan oleh jumlah uap yang dimasukkan ke turbin.

Setelah turbin dihubungkan ke sistem daya, selanjutnya recoder mengukur prosentase bukaan katub. (Waskito & Hasibuan, 2016)

f. Temperature Measurement

Fungsi pengukuran temperatur turbin uap :

- a. Mengetahui tingkat keadaan suatu zat (uap).
- b. Mengoperasikan pada kondisi design (aman).
- c. Memprediksi kecepatan pemuaihan dan penyusutan.
- d. Memprediksi tingkat kerusakan suatu komponen.

Pengukuran temperatur Uap : The main steam line, the first stage, the cold reheat line, the hot reheat line, the turbine extraction line, the crossover line, and the LP turbine exhaust. Pengukuran temperatur lobe oil : saat masuk dan keluar turbin. Pengukuran temperatur fluida pendingin saat masuk dan keluar turbin. Pada umumnya thermocouple ditanam di metal casing. Temperatur metal turbin tingkat pertama pada umumnya digunakan sebagai pedoman untuk menentukan jenis start. antara lain : cold start < 1200C, warm start (1200C s/d 3500C) dan hot start (> 3500C). Bearing umumnya terbuat dari bahan dengan titik leleh rendah, sehingga bila bearing beroperasi pada temperatur tinggi maka mengakibatkan kerusakan. Temperatur bearing dimonitor melalui pengukuran temperatur oil pelumas dan temperatur bearing metal. Thermocouple yang tertanam di bearing metal, selanjutnya akan mengirim signal ke recorder yang sebanding dengan temperatur bearing, namun temperatur bearing selalu lebih tinggi dibanding temperatur minyak pelumas. Temperatur bearing yang melebihi batas normal mengindikasikan terjadinya kerusakan pada bearing sebagai akibat: pembebanan yang berlebihan pada bearing, clearance yang tidak cukup, atau misalignment. Pada waktu operasi temperatur bearing akan meningkat dan hal ini harus didinginkan oleh sistem pelumasan bearing yang bersirkulasi melewati heat exchanger. Agar diperoleh pengukuran lebih akurat maka, thermometer bulb dan thermocouple di tempatkan pada aliran minyak pelumas yang meninggalkan bearing. (Waskito & Hasibuan, 2016)

g. Pressure Measurement

Instrumen ini dimaksudkan untuk memonitor dan control tekanan fluida kerja : Steam, hydraulic system dan lubricant oil. Fungsi pengukuran tekanan :

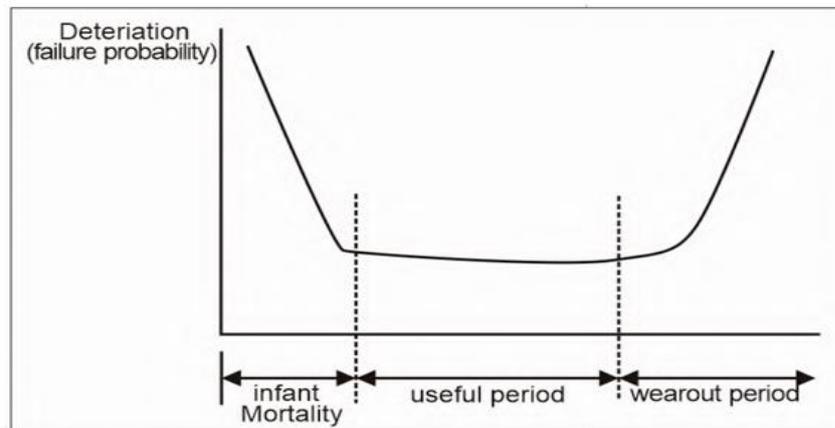
- a. Agar dapat mengoperasikan turbin sesuai dengan range spesifikasi tekanan aman yang ditentukan pabrik.
- b. Agar efisiensi turbin maupun efisiensi siklus sesuai dengan design.
- c. Mengontrol tekanan minyak pelumas agar sesuai dengan kebutuhan tekanan “rotating equipment component” turbin.
- d. Mengontrol tekanan minyak sehingga instrumentasi yang digerakkan melalui sistem hidrolik dapat bekerja dengan baik.

Pada saat beroperasi, tekanan uap turbin dirancang pada “Design Pressure”. Hal ini disesuaikan dengan kondisi efisiensi siklus, tegangan yang diterima oleh blade, nilai pressure drop tiap stage maupun safety. Apabila tekanan diatas batas yang diijinkan maka blade akan mendapatkan tegangan yang berlebih sehingga mempercepat kelelahan, bila tekanan dibawah “Design Pressure ” maka enthalpi akan turun sehingga operasi turbin kurang efisien. Tekanan pada exit turbin pada umumnya didesign vacuum, sehingga bila tekanan lebih tinggi maka kerja ekspansi turbin akan berkurang. Pada sistem ekstraksi uap turbin digunakan sebagai pemanas air (FWH), tekanan uap harus disesuaikan agar efisiensi siklus sesuai dengan design. (Waskito & Hasibuan, 2016)

2.6 Pengawasan dan Diagnosa Kondisi Mesin

Biasanya mesin akan menghasilkan tingkat vibrasi yang rendah apabila berada pada kondisi yang baik atau dengan desain yang sesuai. Peningkatan level vibrasi diakibatkan oleh lamanya jangka waktu pemakaian dan perubahan bentuk pada komponen-komponen mesin. Umur pada mesin akan mengikuti kurva bathtub seperti pada gambar dibawah ini. Level vibrasi juga akan mengikuti kurva ini, karena kerusakan pada mesin selalu ditunjukkan dengan penambahan vibrasi atau tingkat kebisingan. Seperti terlihat pada kurva, tingkat vibrasi berkurang diawal periode operasi dan kemudian bertambah dengan sangat lambat selama periode operasi

normal, dan akan meningkat dengan cepat selama pemakaian yang berlebihan pada akhir periode. (Gede Eka Lesmana et al., 2022)



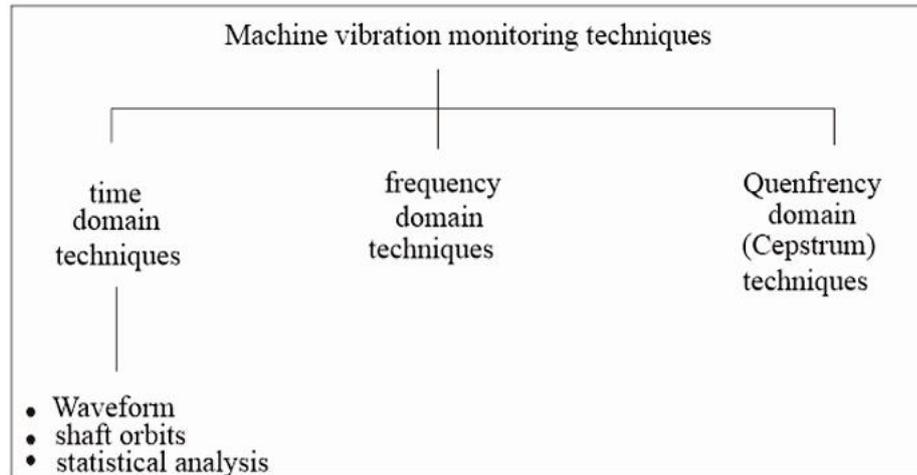
Gambar 2.22 kurva bathup untuk umur suatu mesin

(Gede Eka Lesmana et al., 2022)

Terdapat tiga jenis perawatan yang biasanya digunakan yaitu:

- a. Break down maintenance, perawatan dilakukan pada saat mesin telah rusak dan kemudian diganti dengan mesin baru. Strategi ini digunakan apabila harga mesin murah dan perbaikan tidak mengakibatkan kerusakan pada komponen-komponen yang lain.
- b. Preventive Maintenance, perawatan dilakukan pada interval tertentu seperti setahun sekali atau setelah 3000 jam operasi. Interval waktu ini ditentukan berdasarkan pengalaman.
- c. Condition based maintenance, pada tipe ini perawatan mesin dilakukan dengan melakukan observasi terhadap perubahan kondisi mesin setiap saat.

Untuk melakukan pengawasan terhadap kondisi mesin, dapat digunakan beberapa cara, seperti aural and vision yang merupakan teknik pengawasan dasar, pengawasan arus dan tegangan yang biasanya dilakukan pada motor dan generator yang besar dan pengawasan temperature. Metode yang biasanya digunakan dalam pengawasan kondisi mesin adalah dengan menggunakan analisa getaran. Beberapa jenis dari analisa getaran ditunjukkan oleh gambar di bawah ini. (Gede Eka Lesmana et al., 2022)



Gambar 2.23 Skema Teknik Monitoring Getaran Mesin

(Gede Eka Lesmana et al., 2022)

2.7 Predictive Maintenance

Predictive maintenance bukanlah metode yang ampuh untuk semua faktor – faktor yang menyebabkan kerusakan dari suatu peralatan di pabrik. Bahkan tidak dapat secara langsung mempengaruhi kinerja dari suatu pabrik. Perawatan prediktif pada dasarnya merupakan filosofi atau perilaku yang menggunakan kondisi operasi sesungguhnya dari peralatan untuk mengoptimalkan operasi pabrik. Output dari perawatan dari program prediktif adalah data, perawatan ini termasuk jenis “condition – based maintenance” dimana perubahan kondisi mesin atau peralatan dapat dideteksi sehingga tindakan yang bersifat proaktif dapat segera dilakukan sebelum terjadinya kerusakan mesin. (Berahmana, 2021)

Dewasa ini, pola pemeliharaan prediktif dianggap lebih efektif dan efisien karena pemeliharaan dilakukan berdasarkan hasil pengamatan (monitoring) dan analisa untuk menentukan kondisi dan kapan pemeliharaan akan dilaksanakan, berbeda dengan pola pemeliharaan yang lain seperti pada pola pemeliharaan time base maintenance. Pada pola pemeliharaan time base maintenance, pemeliharaan dilakukan hanya berdasarkan pada jam operasi peralatan/komponen tanpa mempertimbangkan apakah peralatan tersebut masih baik atau tidak. Pengembangan pola pemeliharaan prediktif, memanfaatkan berbagai peralatan test, peralatan monitoring yang telah dimiliki dan mengikuti berbagai metoda analisis

yang dapat diterapkan dalam meningkatkan kualitas pemeliharaan maupun keandalan operasi pembangkit serta efektifitas dalam penggunaan biaya pemeliharaan itu sendiri. (Berahmana, 2021)

Penggunaan dari teknologi predictive maintenance memungkinkan kinerja dari departemen perawatan dapat meningkat karena kondisi permesinan dapat diketahui dengan baik tanpa menghentikan jalannya mesin. Perawatan prediktif menunjukkan penyimpangan dari kondisi normal kerja mesin dan dengan cara ini dapat memberikan cara yang lebih handal untuk mengetahui 6 kerusakan yang sedang dan akan terjadi, dengan menunjukkan komponen yang rusak maka pihak manajemen dapat menyiapkan komponen sesuai kebutuhan yang diinginkan. Kunci utama perawatan prediktif adalah mendeteksi adanya kerusakan atau kesukaran yang akan terjadi atau impending trouble dan segera menyelesaikan masalah tersebut sebelum terjadinya kerusakan mesin atau machine breakdown. Perawatan prediktif bekerja berdasarkan proses monitoring condition yang dilakukan terhadap peralatan yang diinginkan. Hasil dari proses ini adalah data – data hasil pengukuran atau pengujian yang selanjutnya data – data tersebut.

dibandingkan dengan data – data acuan yang sudah diketahui sebelumnya (*known engineering limit*) untuk menentukan kondisi operasi dari peralatan tersebut. Teknik pemantauan yang umumnya digunakan dalam perawatan prediktif meliputi monitoring vibrasi, proses parameter, tribologi, metode thermography, inspeksi visual dan metode non – destructive testing seperti metode ultrasonic. (Berahmana, 2021)

2.8 Manfaat dan Tujuan *Predictive Maintenance*

Predictive Maintenance atau pemeliharaan prediktif adalah pendekatan pemeliharaan peralatan industri yang dilakukan berdasarkan kondisi aktual mesin, bukan berdasarkan jadwal rutin. Tujuan utamanya adalah untuk mendeteksi potensi kerusakan sebelum benar-benar terjadi sehingga perbaikan atau penggantian komponen dapat dilakukan secara tepat waktu dan efisien.

Manfaat dari *Predictive Maintenance* adalah :

- a. Memperpanjang hidup mesin Karena predictive maintenance merupakan perawatan berdasarkan dari hasil pengamatan (*condition monitoring*) kita bisa mengetahui keadaan suatu mesin tersebut. Bila ada yang tidak normal di dalam mesin tersebut, secepatnya kita bisa memperbaiki mesin tersebut sebelum rusak. Sehingga kita bisa memperpanjang umur dari suatu mesin yang dilakukan predictive maintenance.
- b. Memperbaiki efisiensi dari mesin beserta kinerjanya Dengan mengetahui keadaan suatu mesin tersebut, kita bisa memperbaiki mesin tersebut bila keadaan mesin tersebut tidak sesuai dengan kondisi normalnya. Setelah diperbaiki maka efisiensi dari mesin tersebut beserta kinerjanya akan naik.
- c. Digunakan untuk manajemen perawatan Setelah mendapatkan data – data dari predictive maintenance kita bisa melakukan manajemen perawatan di plant tersebut. Manajemen perawatan akan mengurangi biaya perawatan dan juga dapat meminimalisasikan proses breakdown yang tidak terjadwal.
- d. Predictive maintenance digunakan sebagai alat peningkat keandalan suatu peralatan Predictive maintenance digunakan supaya peralatan tersebut selalu dalam kondisi handal dan tangguh ketika digunakan.
- e. Memberikan data – data hasil pengukuran yang dapat digunakan untuk evaluasi, modifikasi dan perbaikan peralatan di kemudian hari Dengan diketahuinya data – data dari predictive maintenance kita bisa menjadwalkan perawatan rutin (*preventive maintenance*) dan bisa mengevaluasi peralatan – peralatan baik yang baru maupun yang sudah lama berdasarkan data tersebut. Keuntungan utama penerapan perawatan prediktif adalah meningkatnya kesiapan peralatan pabrik karena keandalan mesin yang lebih bagus. Kecenderungan rusaknya mesin dimasa mendatang dapat diantisipasi dengan baik sehingga dengan demikian aktivitas perawatan yang direncanakan akan cocok dengan jadwal shutdown peralatan. Keuntungan lain yang didapat adalah berkaitan dengan menurunnya biaya spare part peralatan dan upah buruh. Mesin yang mengalami kerusakan selama beroperasi akan menyebabkan biaya perbaikan kira – kira 10 kali lebih besar dibandingkan bila kegiatan repair

dilakukan sesuai jadwal. Banyak kasus terjadi dimana mesin mengalami kerusakan setelah startup dimana hal ini biasanya terjadi karena built – in defect maupun pemasangan yang tidak sesuai prosedur. Teknik perawatan prediktif dapat digunakan untuk menjamin alignment. (Setyawan & Suryadi, 2018)

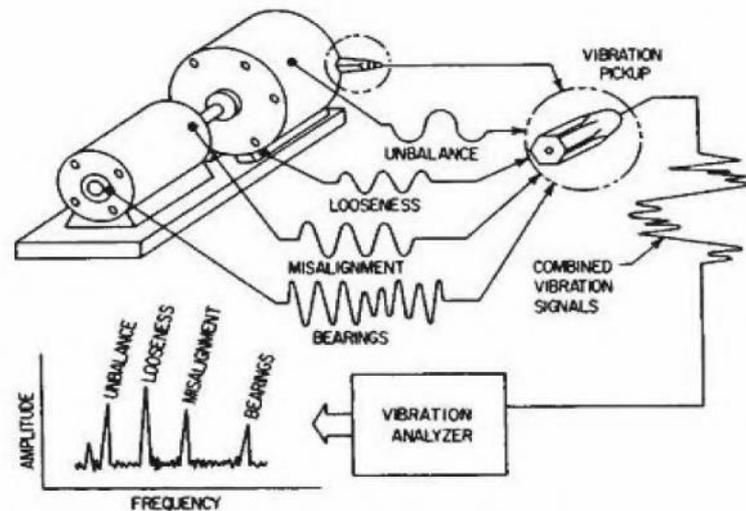
Berbagai teknologi dapat digunakan sebagai alat untuk melaksanakan program perawatan prediktif seperti :

2.8.1 Analisa Vibrasi

Analisa vibrasi digunakan untuk menentukan kondisi operasi dari mesin dimana dalam metoda ini dapat mendiagnosa terjadinya kelainan atau kerusakan pada mesin atau peralatan. Karena kebanyakan peralatan pabrik terdiri atas sistem elektro – mekanis maka analisa vibrasi telah menjadi metoda utama dalam system perawatan prediktif. Dengan menggunakan metoda ini, masalah atau kelainan yang terjadi pada peralatan dapat diidentifikasi lebih awal sebelum masalah tersebut menyebabkan kerusakan peralatan.

Problem yang muncul bisa meliputi bearing yang rusak, kelonggaran mekanis ataupun roda gigi yang pecah. Analisa vibrasi juga dapat mendeteksi adanya misalignment (ketidaklurusan poros) dan imbalance (ketidakseimbangan) yang terjadi pada berbagai peralatan. Pada hakekatnya semua rotating machinery menghasilkan getaran yang merupakan fungsi kelurusan (alignment) dan keseimbangan (balance) dari komponen yang berputar. Pengukuran intensitas getaran pada frekuensi tertentu dapat memberi informasi tentang ketepatan kelurusan poros dan keseimbangannya, kondisi bearing dan roda gigi serta pengaruh struktur permesinan terhadap resonansi mesin. Analisa ini merupakan jenis metoda yang efektif dan bersifat non – instructive serta sangat cocok digunakan untuk memonitor kondisi mesin selama start – up, shutdown, dan operasi normalnya. Analisa vibrasi ini biasanya digunakan untuk peralatan roda gigi. Peralatan yang digunakan untuk analisa vibrasi dapat dibagi menjadi 2 bagian yaitu sensor atau transducer yang dipasang pada machine housing atau bearing cap dan analyzer atau vibration monitoring yang berfungsi mengolah data hasil pengukuran

agar dapat digunakan untuk mendiagnosa masalah yang timbul. (IB.P.P.Mahartana dan Harus Laksana Guntur, 2017)



Gambar 2.24 Proses analisa vibrasi

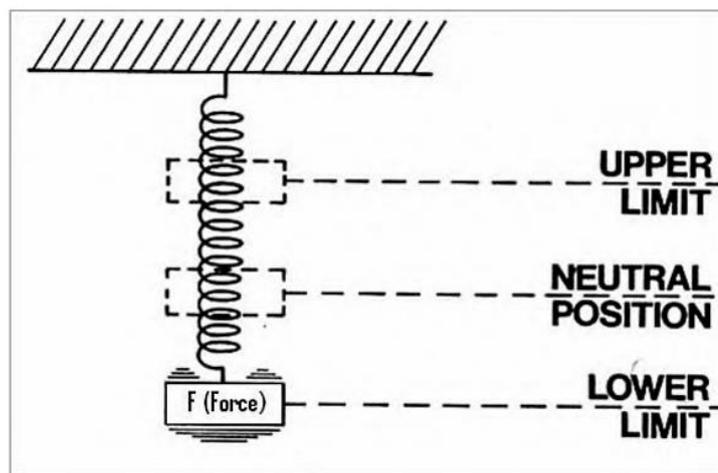
(IB.P.P.Mahartana dan Harus Laksana Guntur, 2017)

2.9 Pengertian Vibrasi

Suatu partikel yang bergerak bolak-balik terhadap posisi kesetimbangannya atau gerakan maju mundur, atas bawah dari posisi diam disebut vibrasi (getaran). Sebagian besar mesin, getaran ini tidak diinginkan karena selain meningkatkan tegangan juga mengurangi energy yang seharusnya digunakan untuk kefungsiian mesin itu sendiri. Getaran ditandai dengan perubahan secara periodic dari suatu besaran. Besaran yang menyatakan getaran dapat berupa suhu, simpangan, sudut, tekanan, tegangan listrik, kecepatan, dll. Getaran dapat dilihat dimana-mana, misalnya sebuah pegas dimana ujung atasnya dilekatkanpada benda diam dan ujung bawahnya diberikan beban seperti pada Gambar 2.8 dibawah ini. (Erapabrianto et al., 2019)

Dalam dunia teknik mesin dan perawatan industri, pemantauan kondisi mesin berputar menjadi sangat krusial untuk mencegah kerusakan dini dan meningkatkan keandalan operasional. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah pengukuran getaran. Getaran merupakan indikator utama dari

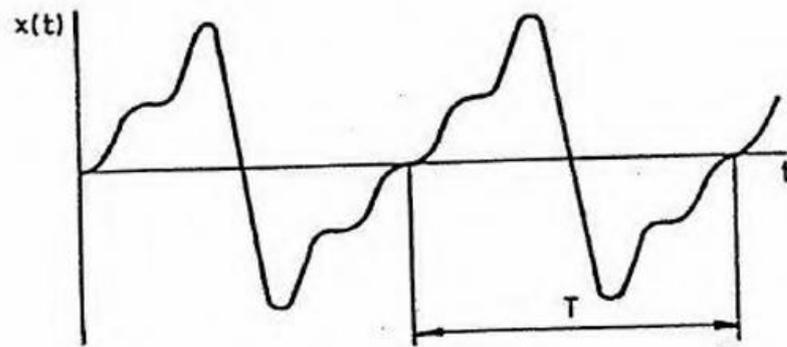
ketidakseimbangan, kelainan pada bantalan, pelurusan poros yang salah, atau bahkan kegagalan structural. Mesin berputar, seperti pompa, motor listrik, dan turbin, sangat rentan terhadap perubahan kondisi operasional akibat variasi beban. Getaran adalah gerakan osilasi dari suatu benda atau partikel terhadap titik keseimbangannya. Dalam mekanika, getaran dibedakan menjadi dua, yaitu getaran bebas dan getaran paksa. Getaran bebas terjadi saat sistem berosilasi tanpa adanya gaya luar setelah diberikan gangguan awal, sedangkan getaran paksa terjadi saat sistem bergetar di bawah pengaruh gaya luar yang terus-menerus.



Gambar 2. 25 Sistem getaran pada sebuah pegas (Erapabrianto et al., 2019)

Secara umum, gerak getaran merupakan suatu fungsi periodic. Fungsi periodic dapat dinyatakan sebagai :

Contoh fungsi periodic dapat digambarkan dalam Gambar 2.4. nilai kebalikan dari T disebut frekuensi, yaitu $f = 1/T$. Frekuensi menyatakan jumlah getaran per satuan waktu. Satuan frekuensi adalah Hertz dan disingkat dengan Hz. Getaran dengan frekuensi 10 Hz, misalnya, berarti bahwa getaran tersebut bergetar 10 siklus dalam 1 sekon. (Fakhrur et al., n.d.)



Gambar 2. 26 Fungsi Periodik
(Fakhrur et al., n.d.)

Disamping frekuensi f dikenal pula frekuensi sudut yang diberi lambang ω . Satuan frekuensi sudut ini adalah rad/s. Hubungan antara f dan ω dapat dituliskan sebagai berikut :

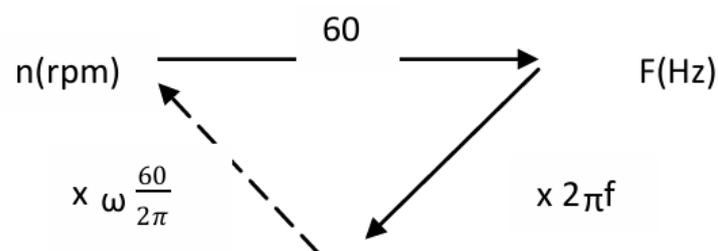
Dalam praktek sering digunakan tiga istilah berikut :

f = frekuensi linier (Hz)

ω = frekuensi sudut (rad/s)

n = kecepatan (frekuensi) putar (rpm)

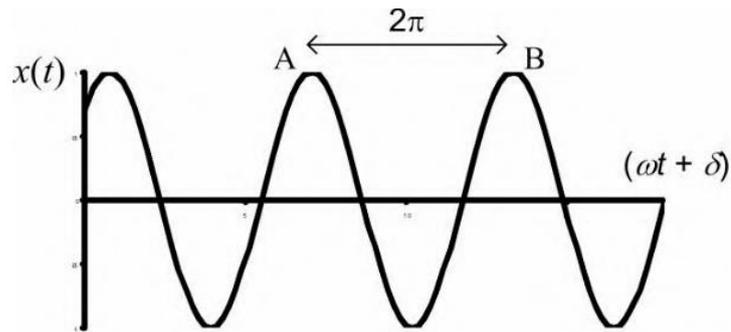
Adapun hubungan antar ketiganya adalah sebagai berikut :



Gambar 2.27 Hubungan antara frekuensi linier, frekuensi sudut, dan kecepatan putar

Dalam praktek sering dicampuradukkan penggunaan f , ω dan n . Walaupun demikian, masing-masing besaran dapat dikenali dari satuan yang digunakan. Selain dinyatakan sebagai fungsi periodic, getaran dapat dinyatakan dalam fungsi harmonic. Fungsi harmonic sederhana dapat dituliskan sebagai :

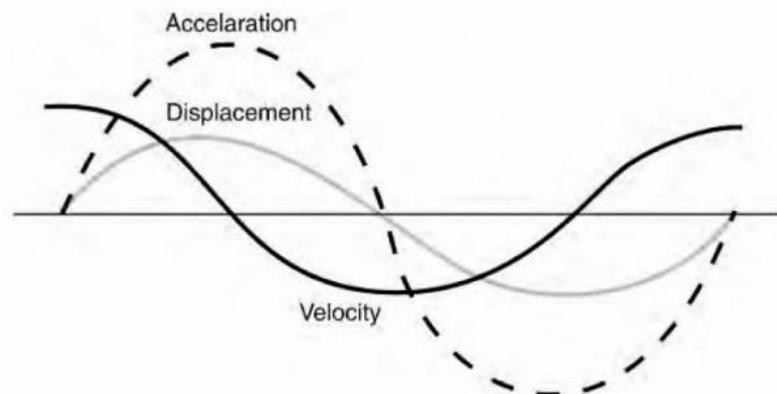
Dalam persamaan tersebut, A merupakan amplitude dan ω merupakan frekuensi sudut. Fungsi harmonic, di gambarkan pada Gambar 2.11



Gambar 2. 28 Fungsi harmonik sederhana

(Fakhrur et al., n.d.)

Persamaan merupakan persamaan yang penting karena persamaan-persamaan tersebut menggambarkan hubungan antara amplitude simpangan, amplitude kecepatan dan amplitude percepatan. Jadi bila salah satu dari amplitude ini diketahui maka amplitude yang lain dapat dihitung dengan mudah. Gambar 2.12 dibawah ini menunjukkan hubungan antara simpangan, keceootan dan percepatan dala gerakan harmonis. (Fakhrur et al., n.d.)



Gambar 2.29 Hubungan antara simpangan, kecepatan dan percepatan dalam gerak harmonik sederhana (Fakhrur et al., n.d.)

Dari persamaan simpangan, kecepatan dan percepatan dari partikel yang bergetar kita dapatkan bahwa simpangan maksimum atau amplitude adalah A , kecepatan maksimum adalah ωA dan percepatan maksimum adalah $\omega^2 A$. Jika simpangan mencapai maksimum dalam arah manapun, kecepatan haruslah sama dengan nol karena sekarang kecepatan haruslah berubah arah. Sebaliknya percepatan pada saat ini mencapai harga maksimum, tetapi berlawanan arah dengan simpangan ketika simpangan sama dengan nol, kecepatan mencapai maksimum dan percepatan sama dengan nol. Kecepatan partikel bertambah ketika partikel menuju ke titik seimbang dan berkurang kembali ketika ia bergerak menuju ke simpangan maksimum, sama halnya bandul ayunan. (Fakhrur et al., n.d.)

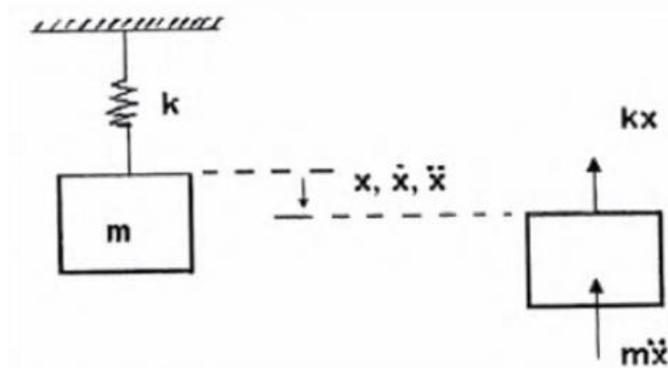
2.10 Klasifikasi Getaran

Berdasarkan gangguan yang bekerja getaran dapat dibagi menjadi 2 yaitu getaran bebas dan getaran paksa.

a. Getaran Bebas

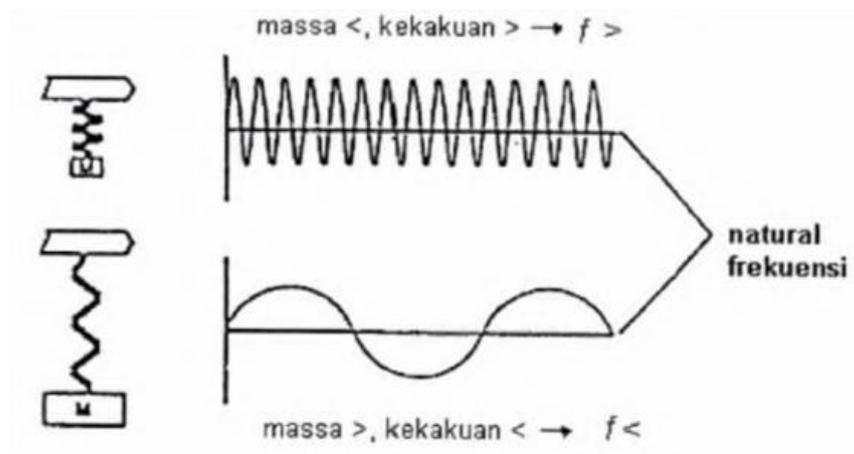
Getaran bebas adalah gerak system getaran tanpa adanya gangguan dari luar. Gerakan ini terjadi karena kondisi awal saja. Bila system tidak memiliki redaman, maka getaran yang terjadi akan berlangsung terus menerus tiada hentinya. Namun kondisi ini tidak pernah dijumpai dalam praktek karena system getaran selalu memiliki redaman. Adanya redaman akan menyebabkan amplitudo getaran semakin lama semakin kecil sehingga akhirnya berhenti. (Rizky & Wibawaputra, 2024)

Setiap benda yang mempunyai massa dan kekakuan akan mampu bergetar. Getaran bebas tanpa redaman adalah getaran dimana pengaruh dari gaya gesekan diabaikan. Bila benda tersebut bergetar bebas, maka getaran akan terjadi pada frekuensi pribadinya. Contoh paling sederhana dari getaran bebas tak teredam adalah getaran system massa pegas seperti yang diperlihatkan pada Gambar



Gambar 2.30 Model Getaran Bebas Tak Teredam
(Rizky & Wibawaputra, 2024)

Bila benda diberi simpangan kemudian dilepas, maka benda tersebut akan bergetar pada frekuensi pribadinya, pada Gambar dibawah ini



Gambar 2.31 Getaran bebas tak teredam
(Rizky & Wibawaputra, 2024)

Natural frekuensi adalah frekuensi yang terjadi akibat gangguan dari system itu sendiri. gangguan ini bisa berupa gaya input, elektro, bunyi, ataupun mekanik.

b. Getaran Paksa

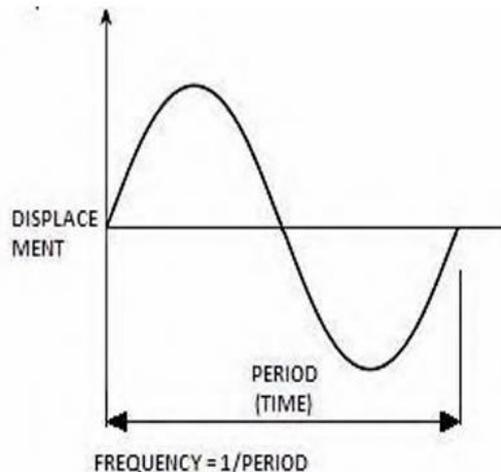
Getaran paksa adalah getaran yang mendapat gangguan/rangsangan dari gaya luar. Jika rangsangan tersebut berisolasi, maka system akan

terpengaruh oleh frekuensi rangsangan. Jika frekuensi natural sama dengan frekuensi rangsangan maka akan terjadi resonansi dan akan mengakibatkan osilasi yang besar dan berbahaya

2.11 Parameter Getaran

a. Frekuensi

Didefinisikan sebagai jumlah gelombang yang terjadi dalam satuan waktu [1/det] = [Hertz]. Satuan yang biasa digunakan dalam suatu pengukuran adalah Revolutian per Minutes (RPM) yaitu 60x frekuensi dalam Hertz. Adapun Gambarnya dapat dilihat pada Gambar 2.16 dibawah ini. (Isranuri et al., 2019)



Gambar 2.32 Frekuensi Getaran
(Isranuri et al., 2019)

b. Amplitudo

Didefinisikan sebagai besaran simpangan maksimum dari benda yang bergetar. Amplitude dapat diwakili sebagai displacement [mils], Velocity [in/s], atau acceleration [in/s²].

c. Displacement

Diartikan sebagai perubahan actual dari suatu jarak atau posisi dari suatu objek yang relative terhadap titik referensi dan biasa digunakan dalam satuan [mils, in, mm]. pengukuran amplitude yang sering digunakan dalam displacement adalah peak to-peak.

d. Velocity

Didefinisikan sebagai perubahan displacement terhadap waktu (turunan pertama, atau \dot{x}) dan biasa menggunakan satuan [in/s]. Displacement velocity sering dipakai didalam pengukuran getaran pada machine housing atau housing bearing dan biasa dipakai pada getaran 0 sampai 1000 Hz. Pengukuran amplitude yang sering juga dipakai dalam velocity adalah zero-to-peak (Peak) atau Peak Value (PV)

e. Acceleration

Didefinisikan sebagai perubahan velocity terhadap waktu (turunan kedua dari displacement, atau \ddot{x}) dan biasa menggunakan satuan [in/s²]. Amplitude acceleration sering digunakan pada frekuensi diatas 1000 Hz. (Isranuri et al., 2019)

2.12 Getaran dan Kondisi Mesin

Mesin yang ideal tidak akan bergetar karena energi yang diterimanya digunakan sepenuhnya untuk kefungsiannya mesin itu sendiri. dalam praktek mesin yang dirancang dengan baik getarannya relatif rendah namun untuk jangka waktu pemakaian yang lama akan terjadi kenaikan level getaran karena hal berikut :

- a. Keausan pada elemen mesin.
- b. Proses pemantapan fondasi sedemikian rupa sehingga terjadi deformasi dan mengakibatkan misalignment pada poros.
- c. Perubahan perilaku dinamik pada mesin sehingga terjadi perubahan frekuensi pribadi.

Pada jaman dahulu problema getaran dapat dirasakan oleh operator karena alasan berikut :

- a. Putaran kerja mesin relatif rendah sehingga frekuensinya masih dapat dirasakan.

Sedangkan dewasa ini problema getaran permesinan tak teramati dengan detail karena alasan berikut :

- a. Putaran kerja mesin yang relatif tinggi sehingga sulit merasakan getaran yang terjadi.

- b. Interaksi yang relatif jarang antara operator dengan mesin karena masih dioperasikan menggunakan sistem control (JASMINE, 2014)

Keadaan di atas mengakibatkan bahwa pemantauan getaran mesin dewasa ini tidak dapat lagi dilakukan secara kualitatif sehingga pemakaian peralatan getaran untuk memantau getaran yang terjadi adalah merupakan keharusan. Umumnya elemen mesin bertumpu pada sistem bantalan sehingga gaya eksitasi getaran pada elemen tersebut diteruskan pula ke sistem tumpuannya. Karena itu pemantauan sinyal getaran dilakukan pada rumah bantalan. Sinyal getaran yang dipantau tersebut berupa sinyal getaran dalam domain waktu yang dapat dikonversikan lebih lanjut kedalam domain frekuensi. Setiap getaran mesin memiliki spectrum dengan ciri tertentu. (JASMINE, 2014)

2.13 Klasifikasi Pengukuran Getaran

Pengukuran getaran merupakan salah satu metode paling penting dalam pemantauan kondisi (condition monitoring) dan diagnosis dini kerusakan pada mesin-mesin industri, termasuk turbin uap. Getaran mekanis muncul akibat gaya dinamis yang bekerja pada komponen mesin, dan karakteristik getaran tersebut dapat mengindikasikan kondisi operasional dari sistem mesin. Dalam konteks pengoperasian turbin, getaran yang melebihi batas wajar dapat menandakan adanya masalah seperti ketidakseimbangan rotor, kerusakan bantalan, ketidaksejajaran.

Pengukuran getaran permesinan dapat dikelompokkan sebagai berikut :

- a. Pengukuran untuk mengetahui level getaran Pengukuran ini umumnya melibatkan data sinyal getaran dalam domain waktu. Ciri pengukuran memiliki rentang waktu pengukuran yang lama (ordenya menit), sehingga diperoleh informasi level getaran yang stabil dalam besaran rms (root mean square). Alat ukur yang digunakan adalah jenis “Vibration Level Meter” baik yang analog maupun yang digital. Hasil pengukuran level getaran umumnya untuk dibandingkan dengan besaran standar (standar ISO, DIN, BS, dll) sehingga dapat diketahui getaran mesin tersebut dalam batas aman atau tidak. (Barik & Handaja, 2023)

- b. Pengukuran untuk analisis getaran. Pengukuran ini lebih rumit daripada pengukuran level getaran karena melibatkan sinyal getaran dalam domain waktu maupun dalam domain frekuensi. Ciri pengukuran ini memiliki rentang waktu pengukuran yang pendek karena dipengaruhi oleh pemilihan rentang frekuensi pengukuran. Karena itu harus hati-hati dalam menentukan level getaran dari sinyal domain waktu yang diperoleh dari pengukuran ini. Alat ukur yang digunakan adalah jenis CSI (Computational System Incorporated) sehingga dapat dilakukan proses konversi dari data domain waktu ke domain frekuensi. CSI ini dapat juga dilakukan untuk pengolahan data lebih lanjut yang mana nantinya berguna untuk analisis sinyal getaran untuk memperoleh keperluan diagnosa kemungkinan cacat dalam mesin tersebut. (Barik & Handaja, 2023)

Dalam suatu pengukuran getaran mesin tujuan utama adalah untuk mendapatkan data dimana dengan melalui pemantulan sinyal getaran secara berkala maka kita dapat mengetahui kondisi mesin yang sebenarnya. Data-data tersebut merupakan sumber informasi yang sangat berharga tentang kelainan atau kerusakan yang diketahui beserta spectrum getarannya. Dengan demikian kerusakan dan kelainan yang sama yang pernah terjadi akan dapat diidentifikasi dengan cepat. Selain itu data-data tersebut dapat juga dimanfaatkan untuk mengubah spesifikasi rancangan sehingga tingkat keandalan mesin dapat dinaikkan. Tujuan lain dari pengukuran getaran mesin adalah : Untuk mengetahui besar amplitude getaran. Untuk keperluan analisis struktur dinamik. Sinyal getaran yang terjadi pada suatu struktur sebenarnya mencirikan perilaku dinamik struktur tersebut karena respon getarannya tergantung pada perilaku dinamik dan stimulus yang bekerja pada struktur tersebut. (Sinyal et al., n.d.)

2.14 Pengertian Vibrasimeter

Vibrasimeter adalah alat ukur yang dirancang untuk mengukur tingkat vibrasi (getaran) pada peralatan atau sistem mekanik. Alat ini digunakan untuk memantau kondisi operasional mesin secara langsung di lapangan, sehingga menjadi komponen penting dalam pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*) dan pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*). Vibrasimeter memungkinkan teknisi atau operator mendeteksi adanya kerusakan atau ketidakwajaran pada mesin sebelum terjadi kegagalan total (Mobley, 2002).



Gambar 2. 33 Alat Ukur Vibrasimeter
(Adibrata Unggul Jaya)

2.14.1 Prinsip Kerja Vibrasimeter

Vibrasimeter bekerja berdasarkan prinsip deteksi gerakan dinamis pada permukaan atau komponen yang bergetar. Sensor pada vibrasimeter, biasanya berupa akselerometer, akan mendeteksi gerakan osilasi dan mengubahnya menjadi sinyal listrik melalui efek piezoelektrik. Sinyal tersebut kemudian dikonversi oleh sistem elektronik menjadi data numerik yang menggambarkan besaran vibrasi, seperti percepatan (m/s^2), kecepatan (mm/s), atau perpindahan (μm). Pemilihan parameter ini bergantung pada jenis vibrasi dan komponen yang diukur (Bently & Hatch, 2003).

Vibrasimeter adalah perangkat pengukuran getaran mekanis yang digunakan untuk mengetahui kondisi dinamis dari suatu mesin, termasuk turbin uap, pompa, motor listrik, dan mesin-mesin berputar lainnya. Vibrasimeter digunakan dalam program *condition monitoring* dan *predictive maintenance* untuk mendeteksi dini adanya kerusakan seperti ketidakseimbangan, misalignment, keausan bantalan, serta resonansi struktur (Bently & Hatch, 2002).

Menurut Randall (2011), pengukuran getaran memungkinkan teknisi untuk mengidentifikasi dan mengukur besarnya gerakan osilasi dari suatu komponen mesin, baik dalam bentuk percepatan, kecepatan, maupun perpindahan.

2.14.2 Jenis Sensor Getaran dalam Vibrasimeter

a. Akselerometer

Akselerometer merupakan jenis sensor yang paling umum digunakan dalam vibrasimeter. Sensor ini mengukur percepatan dari gerakan getaran. Akselerometer biasanya menggunakan bahan piezoelektrik yang menghasilkan muatan listrik saat mengalami tekanan mekanik akibat getaran.

b. Velometer

Velometer mengukur kecepatan vibrasi. Sensor ini sering digunakan pada aplikasi pemantauan mesin karena kecepatan vibrasi (mm/s) berkaitan langsung dengan tingkat keparahan kerusakan pada komponen.

2.14.3 Parameter Vibrasi yang Diukur

a. Amplitudo

Amplitudo menggambarkan besarnya getaran, yang dapat dinyatakan dalam satuan percepatan, kecepatan, atau perpindahan.

b. Frekuensi

Frekuensi adalah jumlah siklus getaran yang terjadi dalam satu detik (satuan: Hz). Frekuensi dapat mengidentifikasi jenis kerusakan spesifik, seperti *unbalance*, *misalignment*, atau kerusakan bearing.

c. Fase

Fase adalah parameter penting dalam analisis getaran untuk menentukan hubungan antara dua titik pengukuran, dan sangat penting dalam *phase analysis* dan *orbital analysis*.

2.14.4 Fungsi dan Manfaat Vibrasimeter dalam Industri

Dalam dunia industri modern, vibrasimeter memiliki berbagai fungsi penting, antara lain:

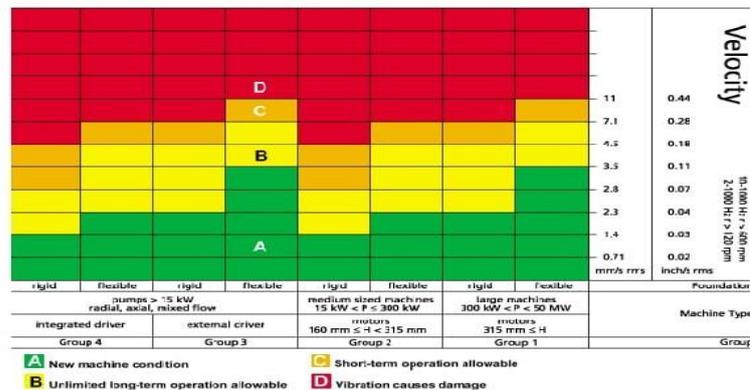
- a) Monitoring kondisi mesin secara langsung untuk mengetahui adanya potensi gangguan.
- b) Deteksi dini kerusakan, seperti ketidakseimbangan, keausan bearing, atau pelepasan fondasi.
- c) Menurunkan biaya pemeliharaan dengan mencegah kerusakan besar melalui tindakan preventif.
- d) Meningkatkan keselamatan kerja, dengan menjaga stabilitas operasi mesin berputar.
- e) Menentukan jadwal perawatan berdasarkan kondisi aktual, bukan waktu tetap.

Penggunaan vibrasimeter sangat umum di industri pembangkit listrik, petrokimia, manufaktur berat, kelapa sawit, dan industri pengolahan air.

2.14.5 Standar Pengukuran Vibrasi

Beberapa standar internasional yang digunakan dalam pengukuran dan evaluasi vibrasi mesin, antara lain:

Standar ISO 10816-3



Gambar 2. 34 Standar Vibrasi ISO

(Barik & Handaja, 2023)

- ISO 10816-1:1995 – Standar ini memberikan panduan evaluasi vibrasi pada mesin berdasarkan pengukuran pada bagian non-rotating. Kategori batas getaran dibagi menjadi empat zona: A (baik), B (masih dapat diterima), C (memerlukan perhatian), dan D (berbahaya).
- ISO 7919 – Digunakan untuk pengukuran vibrasi pada poros yang berputar (rotating shafts).
- VDI 3836 – Standar Jerman yang banyak digunakan sebagai acuan dalam pemeliharaan prediktif.

2.14.6 Kelebihan dan Keterbatasan Vibrasimeter Portabel

Kelebihan:

- Mudah digunakan di lapangan tanpa instalasi rumit.
- Cepat dalam mendeteksi anomali getaran.
- Efisien secara biaya karena tidak memerlukan sistem permanen.

Keterbatasan:

- Tidak bisa digunakan untuk pemantauan terus-menerus.
- Kualitas pengukuran bisa dipengaruhi oleh *skill* operator.
- Tidak mendeteksi masalah internal mesin secara menyeluruh (misalnya retakan kecil dalam poros).

2.14.7 Perkembangan Teknologi Vibrasimeter

Seiring perkembangan teknologi, vibrasimeter kini banyak dilengkapi dengan:

- a. Layar digital dan sistem akuisisi data otomatis.
- b. Kemampuan Bluetooth/Wi-Fi untuk koneksi dengan perangkat lunak pemantauan.
- c. Analisis spektrum frekuensi FFT (Fast Fourier Transform) untuk diagnosis kerusakan.
- d. Integrasi dengan sistem CMMS (Computerized Maintenance Management System).

2.14.8 Aplikasi Vibrasimeter pada Turbin Uap

Pada turbin uap, vibrasi adalah parameter kritis karena berhubungan langsung dengan keandalan dan keselamatan operasi. Vibrasimeter digunakan untuk:

- a. Pemantauan bearing turbin (depan dan belakang)
- b. Deteksi awal misalignment poros akibat ekspansi termal
- c. Pemantauan vibrasi axial yang berkaitan dengan gaya dorong (thrust load)
- d. Verifikasi keseimbangan rotor pasca overhaul
- e. Pemantauan getaran selama start-up dan shutdown

Dalam industri pabrik kelapa sawit, turbin uap sering dioperasikan secara terus-menerus dengan beban fluktuatif. Oleh karena itu, pemantauan vibrasi real-time menggunakan vibrasimeter menjadi sangat penting untuk mencegah shut down mendadak dan kerugian produksi.

2.14.9 Integrasi Vibrasimeter dengan Sistem Monitoring Modern

Beberapa vibrasimeter modern telah dilengkapi dengan:

- a. Sistem wireless berbasis IoT (Internet of Things) untuk pemantauan jarak jauh
- b. Sensor pintar (smart sensor) yang dapat melakukan preprocessing data
- c. Dashboard analitik berbasis cloud
- d. Fitur AI/ML untuk deteksi pola anomali

Sistem seperti ini banyak digunakan di industri 4.0 dan menjadi bagian dari strategi *Predictive Maintenance 4.0*.

2.15 Regresi Linier Sederhana

Regresi linier sederhana adalah salah satu teknik analisis statistik yang digunakan untuk mengetahui hubungan fungsional antara satu variabel bebas (independen) dengan satu variabel terikat (dependen). Dalam konteks teknik, regresi linier sering digunakan untuk melihat bagaimana suatu parameter teknis (misalnya getaran mesin, tekanan, atau suhu) mempengaruhi performa sistem seperti daya keluaran, efisiensi, atau konsumsi bahan bakar.

Regresi linier sederhana adalah metode statistik yang digunakan untuk menentukan hubungan linier antara satu variabel bebas (X) dan satu variabel terikat (Y). Tujuan utama regresi adalah untuk memprediksi nilai variabel Y berdasarkan nilai X.

Persamaan umum regresi linier sederhana adalah:

$$Y = aX + b \dots\dots\dots (1)$$

Di mana:

- a. Y = variabel terikat (respon)
- b. X = variabel bebas (prediktor)
- c. a = koefisien regresi (kemiringan garis)
- d. b = konstanta/intersep (nilai Y saat X = 0)

Langkah perhitungan meliputi:

- a. Menghitung nilai rata-rata X dan Y.

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n} \dots\dots\dots (2)$$

- b. Menentukan nilai koefisien regresi a dengan rumus: $a =$

$$\frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (3)$$

- c. Menghitung nilai intersep b dengan rumus:

$$b \dots\dots\dots (4)$$

Regresi ini digunakan untuk mengevaluasi seberapa besar pengaruh perubahan pada variabel bebas terhadap variabel respon.

2.15.10 Korelasi Pearson

Korelasi Pearson adalah ukuran statistik yang digunakan untuk mengetahui kekuatan dan arah hubungan linier antara dua variabel. Nilai koefisien korelasi r berada pada rentang -1 hingga 1, dengan interpretasi sebagai berikut:

Rumus korelasi Pearson adalah:

$$r = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2][n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \dots\dots\dots (5)$$

2.16 Efisiensi Turbin Uap

Efisiensi turbin uap menggambarkan kemampuan turbin dalam mengubah energi termal (panas) yang terkandung dalam uap menjadi energi mekanik pada poros turbin. Berikut adalah rumus-rumus utama yang digunakan dalam analisis efisiensi.

2.16.1 Standar Efisiensi Ideal Industri

Berdasarkan kajian literatur, efisiensi ideal turbin uap pada skala industri berkisar antara 45% hingga 60%. Rentang tersebut menunjukkan kinerja yang dapat dicapai apabila turbin beroperasi mendekati kondisi desain dengan kualitas uap yang baik serta losses yang minimal (Boyce, 2012).

- a) Efisiensi sekitar 45% umum ditemukan pada turbin uap dengan kapasitas kecil hingga menengah, seperti di pabrik kelapa sawit dan industri agro.
- b) Efisiensi mendekati 60% dapat dicapai pada turbin dengan teknologi modern, misalnya sistem reheater, regenerative feedwater heater, serta condenser berperforma tinggi (Kehlhofer et al., 2009).
- c) Nilai di bawah 45% menunjukkan adanya penurunan kinerja signifikan, baik karena kondisi uap yang kurang ideal, vibrasi berlebih, maupun pemeliharaan yang kurang optimal (Shanmugam, 2010).

2.16.2 Relevansi Standar Efisiensi dengan Penelitian

Standar efisiensi industri (45–60%) menjadi tolok ukur dalam penelitian ini. Dengan membandingkan efisiensi aktual turbin uap terhadap standar, dapat diperoleh:

- a) Penilaian apakah turbin bekerja dalam kondisi ideal.

- b) Indikasi adanya faktor penurunan efisiensi, seperti vibrasi, kualitas uap yang rendah, atau masalah pemeliharaan.
- c) Dasar rekomendasi peningkatan kinerja agar mendekati standar industri.

2.16.3 Daya Teoritis (Ideal)

Daya teoritis adalah jumlah energi yang seharusnya dapat dikonversi oleh turbin dalam kondisi ideal (tanpa rugi-rugi):

$$P_{ideal} = m \times (h_1 - h_2) \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan:

- a. P_{ideal} : Daya teoritis (kW)
- b. m : Laju aliran massa uap (kg/s)
- c. h_1 : Entalpi uap masuk (kJ/kg)
- d. h_2 : Entalpi uap keluar (kJ/kg)

2.16.4 Efisiensi Turbin (η)

Efisiensi turbin dihitung dengan membandingkan daya aktual yang dihasilkan dengan daya teoritis:

$$\eta = \frac{P_{aktual}}{P_{ideal}} \times 100\% \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:

- a. η : Efisiensi turbin (%)
- b. P_{aktual} : Daya aktual yang terukur di poros (kW)
- c. P_{ideal} : Daya teoritis berdasarkan selisih entalpi (kW)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tempat Dan Waktu

3.1.1 Tempat

Penelitian ini dilaksanakan di PT. ADIBRATA UNGGUL JAYA Jl. Patriot No.66, Sunggal, Kec. Medan Sunggal, Kota Medan, Sumatera Utara.

3.1.2 Waktu

Penelitian ini dimulai dari 3 bulan setelah dilaksanakannya seminar proposal. Dalam jangka waktu itu sudah cukup untuk mengumpulkan data-data yang dibutuhkan untuk menganalisa dan untuk mendapatkan hasil dari penulisan tugas akhir ini.

Tabel 3. 1 Waktu Penelitian

No	Keterangan	Bulan Ke								
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	Kajian Literatur									
2	Penyusunan proposal Penelitian									
3	Penulisan Bab 1 Sampai Bab 3									
4	Analisa Data									
5	Seminar Proposal									
6	Seminar Hasil									
7	Sidang Akhir									

3.2 Tahap Identifikasi

Pada tahapan awal dilakukan pengamatan terhadap masalah apa saja yang dirumuskan menjadi tujuan dari penelitian. Dimana studi literatur dimulai dari mencari dan mempelajari bahan pustaka yang berkaitan dengan vibrasi dan penyebab – penyebab kerusakannya. Studi literatur ini diperoleh dari berbagai sumber, diantaranya text book maupun modul. beberapa sumber lain seperti jurnal ilmiah dan beberapa penelitian terdahulu. Kemudian dilakukan pengamatan lapangan secara langsung terhadap turbin uap. Observasi meliputi identifikasi alat untuk mengukur vibrasi dari dan mengidentifikasi apa saja penyebab vibrasi pada turbin uap.

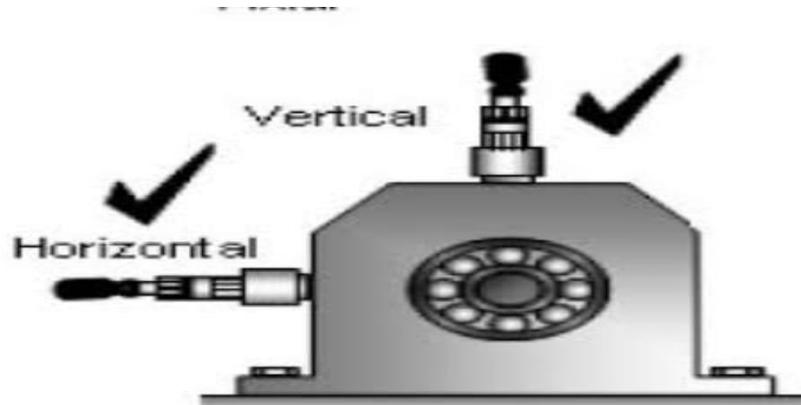
3.3 Pengumpulan data dan Analisa

Dari studi literatur dan observasi mengenai vibrasi, dilakukan pengambilan data pada turbin khususnya data mengenai vibrasi dari turbin. Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif eksperimental yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh tingkat getaran terhadap kinerja turbin uap, khususnya pada keluaran daya listrik. Metode yang digunakan adalah pengukuran langsung menggunakan vibrasimeter digital yang mampu mendeteksi getaran dalam satuan kecepatan (mm/s), frekuensi (Hz), dan amplitudo (μm). Melalui pendekatan ini, data numerik getaran dikumpulkan dari beberapa titik pada sistem turbin, kemudian dianalisis secara statistik untuk mengidentifikasi hubungan antara getaran dan penurunan efisiensi atau performa turbin.



Gambar 3. 1 Vibrasi Meter(Adibrata Unggul Jaya)

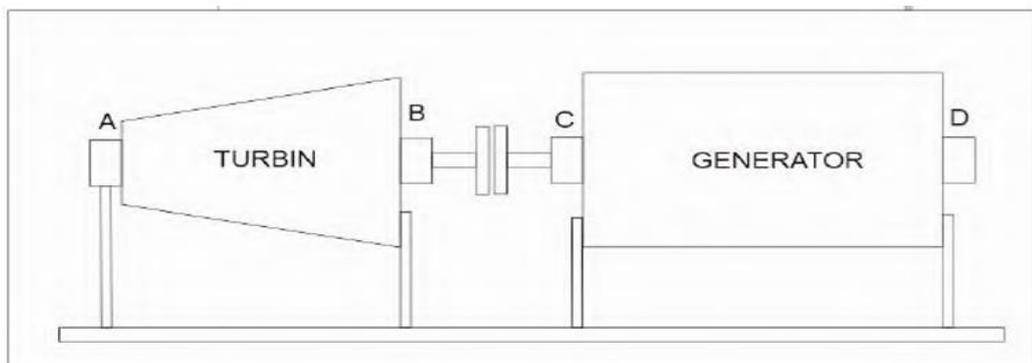
Pada gambar dibawah ini akan ditunjukkan skema cara pengukuran vibrasi dari arah vertikal dan horizontal. Terdapat 2 pengukuran yang membaca vibrasi dari arah x dan dari arah y.



Gambar 3. 2 Letak Pengukuran Vibrasi(Fakhrur et al., n.d.)

Titik pengukuran ditentukan berdasarkan standar ISO 10816 dan lokasi kritis pada mesin, yaitu:

- a. Bearing Depan (Drive End / DE) – titik horizontal, vertikal
- b. Bearing Belakang (Non-Drive End / NDE) – titik horizontal, vertikal.



Gambar 3.3 Sketsa Letak Vibrasi Meter(Fakhrur et al., n.d.)

Keterangan:

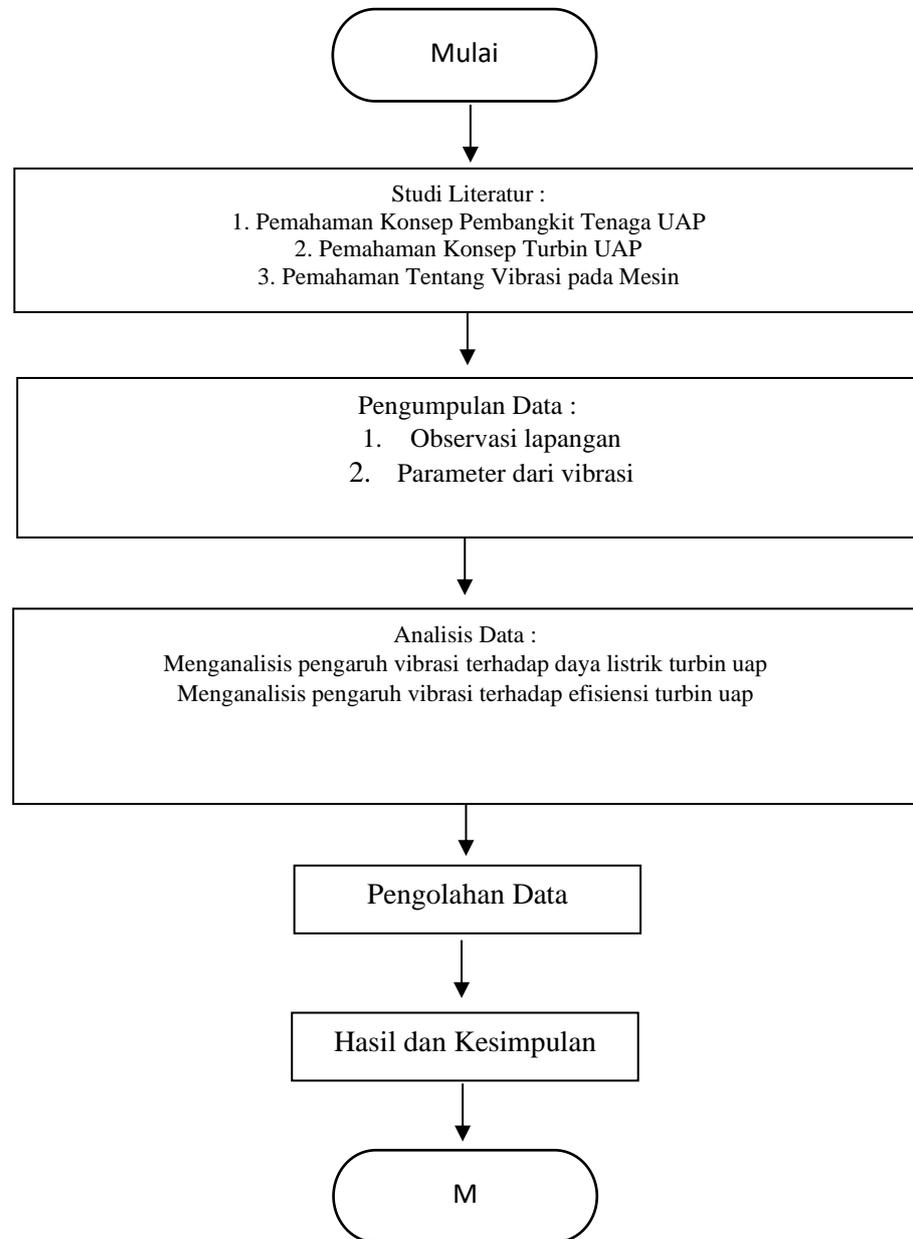
A: pada trust bearing inlet turbin

B: pada journal bearing outlet turbin

Setelah melakukan pengambilan data yang diperlukan maka dilakukan penganalisaan spectrum apa penyebab penyebab vibrasi setelah itu maka dilakukan analisa pemecahan apa sajakah cara penanggulangan vibrasi dari Turbin Uap.

3.4 Flowchart

Adapun proses alir penelitian ini adalah sebagai berikut :



1. Mulai

Tahapan awal penelitian dimulai, ini menandakan bahwa proses analisis vibrasi pada turbin uap akan dilakukan secara sistematis.

2. Studi Literatur

Pada tahap ini, dilakukan kajian pustaka untuk memahami teori dan konsep yang berkaitan dengan penelitian, meliputi:

- a. Pembangkit Tenaga Uap dengan memahami cara kerja pembangkit tenaga uap sebagai sistem utama dalam penelitian.
- b. Turbin Uap dengan mengetahui bagaimana turbin uap bekerja serta faktor-faktor yang dapat mempengaruhi efisiensinya.
- c. Vibrasi pada Mesin Mengkaji penyebab, dampak, dan metode analisis vibrasi yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi turbin.

3. Pengumpulan Data

Setelah memahami konsep dasar, penelitian berlanjut dengan pengambilan data di lapangan. Proses ini mencakup:

- a. Observasi Lapangan dengan melakukan pengamatan langsung terhadap turbin uap untuk memahami kondisi operasionalnya.
- b. Parameter Vibrasi dengan mengumpulkan data vibrasi yang terjadi pada turbin, misalnya amplitudo, frekuensi, dan pola getaran.

4. Pengolahan Data

Data yang telah dikumpulkan kemudian diolah untuk mendapatkan informasi yang lebih bermakna, termasuk:

- a. Mengukur Clearance Bearing dengan menentukan jarak bebas antara bantalan dan poros turbin untuk melihat apakah ada ketidakseimbangan atau gesekan berlebih.
- b. Mengukur Frekuensi Vibrasi dengan menganalisis pola getaran untuk mengetahui apakah ada anomali pada turbin uap.
- c. Data Hasil Vibrasi dengan mengolah data yang telah diukur untuk memahami apakah vibrasi yang terjadi masih dalam batas aman atau berpotensi menimbulkan kerusakan.

5. Analisis Data

Setelah data diproses, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis terhadap hasil yang diperoleh. Analisis ini mencakup:

- a. Menganalisis Vibrasi terhadap Komponen Turbin yaitu mengidentifikasi dampak vibrasi terhadap elemen mekanis dalam turbin, seperti poros, bantalan, dan rotor.
- b. Menganalisis Pengaruh Vibrasi terhadap Daya Listrik Turbin Uap dengan melihat bagaimana vibrasi dapat mempengaruhi efisiensi dan performa turbin dalam menghasilkan listrik..

6. Keputusan: Apakah Hasil Valid?

- a. Jika tidak valid, berarti ada ketidaksesuaian dalam hasil analisis, sehingga mungkin perlu dilakukan perbaikan dalam pengolahan data atau pengumpulan data ulang.
- b. Jika valid, maka penelitian berlanjut ke tahap kesimpulan.

7. Hasil dan Kesimpulan

- a. Menyajikan hasil akhir dari analisis yang telah dilakukan.
- b. Menarik kesimpulan mengenai kondisi vibrasi pada turbin uap dan dampaknya terhadap kinerja sistem pembangkit listrik.

8. Selesai

- a. Penelitian berakhir setelah semua tahapan selesai dan kesimpulan telah diperoleh.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Lokasi dan Objek Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada PT.ADIBRATA UNGGUL JAYA, yang menggunakan turbin uap ELLIOT. Data yang dikumpulkan meliputi tingkat vibrasi pada beberapa titik pengukuran di turbin dan output daya listrik yang dihasilkan selama periode tertentu.

Turbin uap dalam sistem pembangkit tenaga kelapa sawit berfungsi sebagai pengubah energi termal dari uap menjadi energi mekanik yang selanjutnya diubah menjadi energi listrik melalui generator. Efisiensi turbin menjadi salah satu indikator utama dalam menilai kinerja konversi energi dalam sistem ini. Pengukuran langsung dilakukan untuk memperoleh data operasional turbin secara aktual. Data tersebut digunakan untuk menghitung daya teoritis, membandingkannya dengan daya aktual, serta menentukan efisiensi kerja turbin.

4.2 Analisis Statistik: Regresi Linier Sederhana

Untuk mengetahui hubungan antara getaran (X) dan daya listrik (Y) digunakan model:

$$Y = a + bX$$

dengan:

- a. Y : Daya listrik (MW)
- b. X : Getaran RMS (mm/s)
- c. a : Intersep (daya saat vibrasi nol)
- d. b : Koefisien regresi (penurunan daya per kenaikan vibrasi)

4.3 Data Vibrasi Turbine

Berikut adalah data rata-rata vibrasi yang terekam pada beberapa titik pengukuran:



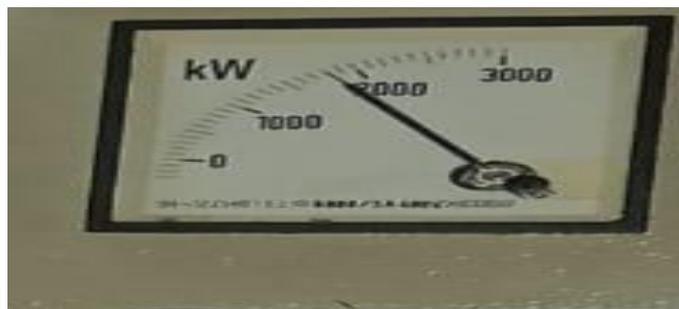
Gambar 4. 1 pengukuran Vibrasi Bearing 1 jam 10.00

Pada gambar 4.1: Menunjukkan proses pengukuran vibrasi pada bearing 1 menggunakan alat ukur vibrasi (vibrasimeter). Nilai vibrasi yang ditampilkan adalah 3,5 mm/s pada jam 10.00.



Gambar 4. 2 pengukuran Vibrasi Bearing 2 jam 10.00

Pada gambar 4.2: Menunjukkan pengukuran vibrasi pada bearing 2 dengan alat ukur vibrasi. Hasil pengukuran menunjukkan nilai 3,8 mm/s pada jam 10.00.



Gambar 4. 3 Keluaran Daya Listrik Turbin jam 10.00

Gambar 4.3: Menampilkan panel indikator daya listrik keluaran turbin uap. Pada jam 10.00, daya yang dihasilkan turbin tercatat sebesar 1800 kW. Data ini dihubungkan dengan nilai getaran bearing untuk dianalisis pengaruhnya terhadap performa turbin.



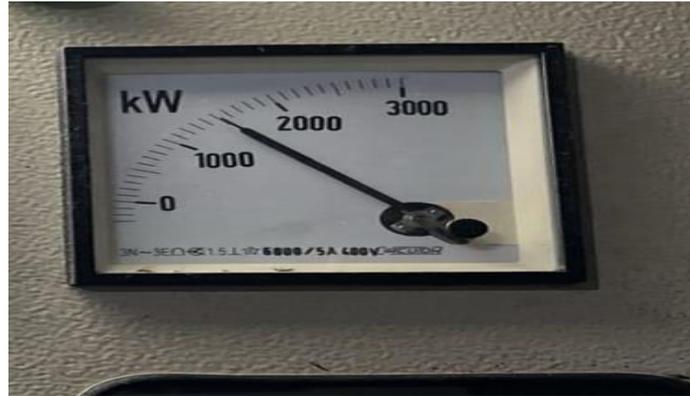
Gambar 4. 4 Pengukuran Vibrasi Bearing 1 jam 14.00

Pada gambar 4.4: Menunjukkan proses pengukuran vibrasi pada Bearing 1 turbin menggunakan alat vibrasimeter pada pukul 14.00. Hasil pengukuran menunjukkan nilai vibrasi sebesar 4,0 mm/s.



Gambar 4. 5 Pengukuran Vibrasi Bearing 2 jam 14.00

Gambar 4.5: Menampilkan proses pengukuran vibrasi pada Bearing 2 turbin dengan alat vibrasimeter pada pukul 14.00. Nilai yang terukur adalah 4,4 mm/s. Nilai ini menunjukkan kondisi getaran pada Bearing 2 yang lebih tinggi dibandingkan Bearing 1, sehingga dapat menjadi indikasi adanya potensi gangguan mekanis.



Gambar 4. 6 Keluaran Daya Listrik Turbin jam 14.00

Pada gambar 4.6: Memperlihatkan panel indikator daya keluaran listrik turbin pada pukul 14.00. Terlihat bahwa daya listrik yang dihasilkan adalah 1500 kW, yang lebih rendah dibandingkan kondisi sebelumnya (1800 kW pada pukul 10.00). Hal ini menunjukkan adanya hubungan antara peningkatan nilai vibrasi pada bearing dengan penurunan daya keluaran turbin.



Gambar 4. 7 Pengukuran Vibrasi Bearing 1 jam 20.00

Pada gambar 4.7: Menunjukkan proses pengukuran vibrasi pada Bearing 1 turbin pada pukul 20.00 menggunakan alat vibrasimeter. Hasil pengukuran menunjukkan nilai vibrasi sebesar 4,6 mm/s. Nilai ini relatif lebih tinggi dibandingkan kondisi sebelumnya, yang menandakan adanya peningkatan getaran pada bearing.



Gambar 4. 8 Pengukuran Vibrasi Bearing 2 jam 20.00

Pada gambar 4.8: Menampilkan pengukuran vibrasi pada Bearing 2 turbin pada pukul 20.00. Alat vibrasimeter menunjukkan hasil 4,9 mm/s. Nilai ini lebih besar daripada Bearing 1, sehingga dapat menjadi indikasi potensi masalah mekanis yang lebih serius pada Bearing 2.



Gambar 4. 9 Keluaran Daya Listrik Turbin jam 20.00

Pada gambar 4.9: Memperlihatkan panel indikator daya keluaran listrik turbin pada pukul 20.00. Daya listrik yang dihasilkan adalah 1300 kW, mengalami penurunan sekitar 500 kW dibandingkan kondisi sebelumnya (1800 kW pada pukul 10.00). Hal ini menguatkan hubungan antara meningkatnya getaran bearing dengan penurunan performa daya keluaran turbin.

Tabel 4. 1 Data Vibrasi

Arah Vibrasi	Frekuensi (Hz)	Bearing depan	Bearing belakang
10:00	50	3.5 (mm/s)	3.8 (mm/s)
14:00	45	4.0 (mm/s)	4.4 (mm/s)
20:00	55	4.6 (mm/s)	4.9 (mm/s)

Pada tabel 4.1: Nilai-nilai di atas termasuk dalam klasifikasi sebagai berikut:

- a. Normal: 2.0 – 3.0 mm/s
- b. Sedang: 3.1 – 3.5 mm/s
- c. Tinggi: > 4.5 mm/s

Standar ISO 10816-3 menyatakan bahwa tingkat vibrasi ≤ 4.5 mm/s untuk mesin dengan kecepatan sedang (600–1.800 rpm) sudah tergolong “tinggi”, sementara $\geq 4,9$ mm/s menunjukkan “perlu perhatian”.

4.4 Data Keluaran Daya Listrik

Berikut adalah data rata-rata keluaran daya listrik dalam periode pengamatan:

Tabel 4. 2 Data Keluaran Daya listrik Turbin

Waktu	Daya Keluaran (MW)	Keterangan Vibrasi
10:00	1,8	Normal (3.5 – 3.8mm/s)
14:00	1,5	Sedang (4.0 – 4.4 mm/s)
20:00	1,3	Tinggi (> 4.6 – 4.9mm/s)

Tabel 4.2 ini menampilkan hubungan antara waktu pengamatan, daya listrik yang dihasilkan turbin (MW), serta keterangan kondisi vibrasi turbin.

- a. Waktu 10:00
 - a) Daya keluaran: 1,8 MW

- b) Keterangan vibrasi: Normal (3,5 – 3,8 mm/s)
 - c) Perhitungan rata-rata vibrasi: $(3,5 + 3,8)/2 = 3,65$ mm/s → dalam kategori normal.
 - d) Artinya, pada jam ini turbin menghasilkan daya cukup tinggi dengan tingkat getaran masih dalam batas aman.
- b. Waktu 14:00
 - a) Daya keluaran: 1,5 MW
 - b) Keterangan vibrasi: Sedang (4,0 – 4,4 mm/s)
 - c) Perhitungan rata-rata vibrasi: $(4,0 + 4,4)/2 = 4,2$ mm/s → dalam kategori sedang.
 - d) Artinya, pada jam ini daya turbin mulai turun dibandingkan jam 10:00, sementara getaran meningkat ke level sedang.
- c. Waktu 20:00
 - a) Daya keluaran: 1,3 MW
 - b) Keterangan vibrasi: Tinggi ($> 4,6 - 4,9$ mm/s)
 - c) Perhitungan rata-rata vibrasi: $(4,6 + 4,9)/2 = 4,75$ mm/s → dalam kategori tinggi.
 - d) Artinya, pada jam malam daya turbin paling rendah dan vibrasi paling tinggi, menunjukkan adanya indikasi penurunan performa turbin.

4.5 Analisis Hubungan Vibrasi terhadap Daya Keluaran

Tabel 4. 3 Tabel Data Statistik

No	Vibrasi (X) mm/s	Daya (Y) MW	X ²	Y ²	XY
1	3.56	1.8	12.67	3.24	6.40
2	4.20	1.5	17.64	2.25	6.30
3	4.75	1.3	22.56	1.69	6.17
Σ	12.51	4.6	52.87	7.18	18.87

4.5.1 Persamaan Regresi Linier:

Rumus regresi linier:

$$Y = aX + b$$

Langkah-langkah:

a) Hitung rata-rata:

$$X = \frac{\sum X}{n} = \frac{12,51}{3} = 4,17$$

$$Y = \frac{\sum Y}{n} = \frac{4,6}{3} = 1,53$$

b) Koefisien:

$$a = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} = \frac{3(18,87) - (12,51)(4,6)}{3(52,87) - (12,51)^2}$$

$$= \frac{56,61 - 57,546}{158,61 - 156,5001} = \frac{-0,936}{2,1099} = -0,4437$$

c) Intercept :

$$\begin{aligned} b &= Y - aX \\ &= 1,53 - (-0,4437)(4,17) \\ &= 1,53 + 1,849 \end{aligned}$$

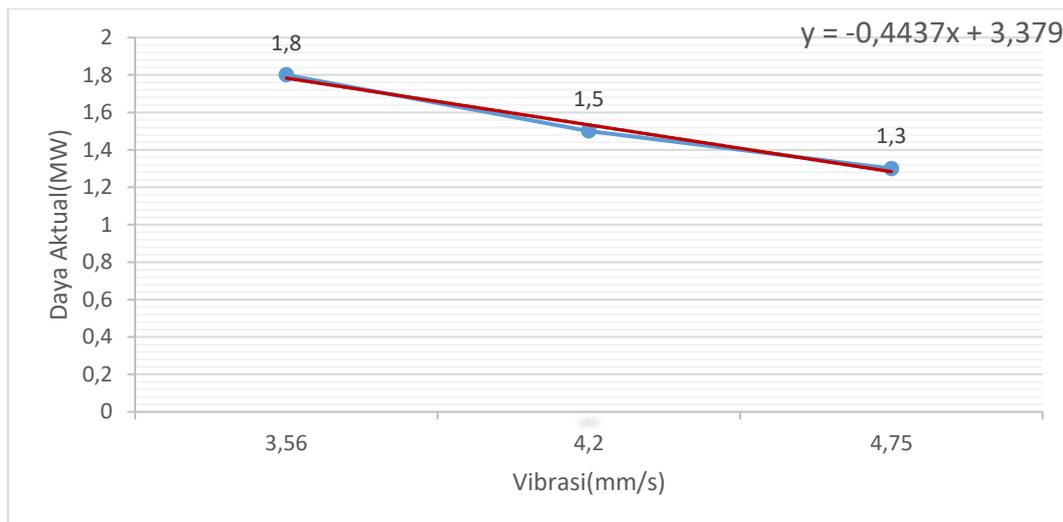
Dari hasil perhitungan diperoleh:

- a. Koefisien regresi = -0,4437
- b. Intersep = 3,379

Sehingga persamaan regresi linier yang menggambarkan hubungan antara vibrasi turbin dengan daya keluaran listrik adalah:

$$Y = -0,4437X + 3,379$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa setiap kenaikan 1 mm/s nilai vibrasi turbin akan menurunkan daya keluaran listrik sebesar 0,4437 MW. Artinya, terdapat hubungan negatif antara vibrasi dengan daya turbin.



Gambar 4. 10 Grafik Persamaan Regresi Linier

Pada grafik 4.10 dapat di jelaskan bahwa:

- a. Garis regresi memiliki kemiringan negatif ($a = -0,4437$), artinya semakin besar vibrasi, daya listrik semakin menurun.
- b. Titik-titik data cukup dekat dengan garis regresi, sehingga persamaan ini bisa digunakan untuk memprediksi daya turbin berdasarkan nilai vibrasi.
- c. Pada vibrasi rendah (sekitar 3,5 mm/s), daya mendekati 1,8 MW.
- d. Pada vibrasi tinggi (sekitar 4,7 mm/s), daya turun ke sekitar 1,3 MW.

Dari grafik 4.10 terlihat bahwa titik-titik data hasil observasi cenderung mengikuti garis regresi, sehingga persamaan regresi yang diperoleh cukup representatif untuk menggambarkan kecenderungan penurunan daya listrik akibat meningkatnya vibrasi.

4.5.2 Koefisien Korelasi (r)

Untuk mengetahui seberapa kuat hubungan antara X dan Y, gunakan rumus korelasi Pearson:

$$\begin{aligned}
 r &= \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2][n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \\
 r &= \frac{3(18,87) - (12,51)(4,6)}{\sqrt{[3(52,87) - (12,51)^2][3(7,18) - 4,6^2]}} \\
 &= \frac{56,61 - 57,546}{\sqrt{(158,61 - 156,5001)(21,54 - 21,16)}} \\
 &= \frac{-0,936}{\sqrt{2,1099 \times 0,38}} = \frac{-0,936}{\sqrt{0,8018}} = \frac{-0,936}{0,895} = -1,045
 \end{aligned}$$

Namun secara umum, nilai $r = -0.98$ hingga -1 mengindikasikan hubungan negatif yang sangat kuat antara vibrasi dan daya.

4.5.3 Interpretasi Hasil

- a. Persamaan regresi:

$$Y = -0,4437X + 3,379$$

Artinya: setiap kenaikan vibrasi 1 mm/s akan menurunkan daya sebesar 0.4437 MW.

- b. Koefisien korelasi:

$r = -1,045$, artinya terdapat hubungan negatif yang sangat kuat antara tingkat vibrasi dan daya turbin. Peningkatan vibrasi berkorelasi langsung dengan penurunan keluaran daya listrik.

4.6 Perhitungan Efisiensi Turbin

Efisiensi turbin uap merupakan indikator sejauh mana energi termal dari uap dapat dikonversi menjadi energi mekanis pada poros turbin. Dalam sistem pembangkit tenaga berbasis uap, perhitungan efisiensi sangat penting untuk mengetahui performa kerja turbin, sekaligus mengevaluasi potensi kerugian energi yang terjadi selama proses konversi. Secara termodinamika, efisiensi turbin uap ditentukan dari kemampuan turbin untuk mengubah entalpi (panas) menjadi daya mekanik. Turbin ideal akan mengubah semua energi panas (perbedaan entalpi antara uap masuk dan keluar) menjadi energi gerak. Dalam praktiknya, sebagian energi hilang akibat gesekan, kebocoran uap, losses di bantalan, dan rugi panas. Daya teoritis turbin dihitung menggunakan rumus:

$$P_{ideal} = m \times (h_1 - h_2)$$

Sementara efisiensi turbin secara umum dirumuskan sebagai:

$$n = \frac{P_{aktual}}{P_{ideal}} \times 100\%$$

4.6.1 Parameter Operasional Turbin

Berdasarkan hasil pengukuran dan observasi di lapangan, berikut adalah data operasi turbin uap yang digunakan dalam analisis ini:

Tabel 4. 4 Parameter Operasional Turbin

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Laju aliran massa uap	m	10.000	kg/jam
Entalpi uap masuk	h ₁	3.050	kJ/kg
Entalpi uap keluar	h ₂	1.050	kJ/kg
Daya aktual (daya poros turbin)	P _a	1.300	kW

Berdasarkan tabel 4.4 hasil pengukuran turbin uap memiliki laju aliran massa sebesar 10.000 kg/jam, yang menunjukkan jumlah uap yang melewati turbin. Energi uap masuk ditunjukkan oleh entalpi masuk (h_1) sebesar 3.050 kJ/kg, sedangkan energi uap keluar setelah ekspansi adalah 1.050 kJ/kg. Selisih kedua entalpi ini merepresentasikan potensi energi yang dapat dikonversi menjadi tenaga mekanik. Dari hasil pengamatan, daya aktual pada poros turbin tercatat sebesar 1.300 kW. Data ini menjadi dasar untuk menghitung efisiensi turbin serta menganalisis kinerjanya dalam mengubah energi panas menjadi energi mekanik.

4.6.2 Data Diketahui:

- a) Laju aliran massa (\dot{m}): 10.000 kg/jam = 2,778 kg/s
- b) Entalpi uap masuk (h_1): 3.050 kJ/kg
- c) Entalpi uap keluar (h_2): 1.050 kJ/kg
- d) Daya aktual (poros) turbin: 1.300 kW

a. Daya Isentropik (Ideal) Turbin

Daya teoritis merupakan jumlah energi termal dari uap yang secara ideal dapat dikonversi menjadi daya mekanis tanpa adanya rugi-rugi sistem. Dihitung dari selisih entalpi uap masuk dan keluar:

$$P_{ideal} = \dot{m} \times (h_1 - h_2)$$

$$P_{ideal} = 2,778 \times (3050 - 1050) = 2,778 \times 2000 = 5,556 \text{ kW}$$

b. Efisiensi Total (Termal) Turbin

Efisiensi turbin aktual dihitung berdasarkan rasio antara daya nyata yang dihasilkan (hasil pengukuran) terhadap daya teoritis:

$$n = \frac{P_{aktual}}{P_{ideal}} \times 100\% = \frac{1300}{5556} \times 100\% = 23,39\%$$

4.6.3 Analisis dan Evaluasi Hasil

a. Evaluasi Efisiensi

Efisiensi sebesar 23,39% menandakan bahwa hanya sekitar seperempat energi panas dari uap yang berhasil diubah menjadi tenaga mekanik. Ini adalah indikasi bahwa terdapat kerugian energi yang signifikan di dalam sistem turbin, baik secara termal maupun mekanis.

Kerugian energi sebesar 76,61% dapat terjadi karena:

- 1) Kerugian mekanis: gesekan antara poros dan bearing, rotor tidak seimbang, atau keausan pada sudu turbin yang menyebabkan vibrasi
- 2) Inefisiensi aliran fluida: turbulensi pada nozzle atau diffuser, back pressure pada kondensor.
- 3) Kondisi uap yang tidak ideal: jika uap yang masuk tidak cukup superheated atau mengandung kelembapan.

b. Perbandingan dengan Standar Industri

Untuk mendapatkan gambaran yang objektif terhadap performa aktual turbin, hasil perhitungan efisiensi dibandingkan dengan rentang efisiensi ideal yang berlaku di industri.

Tabel 4. 5 Perbandingan dengan Standar Industri

Kriteria	Rentang Umum Industri
Efisiensi ideal turbin uap	45–60%
Efisiensi turbin (aktual)	23,39% (hasil perhitungan)

Pada tabel 4.5 menampilkan perbandingan antara efisiensi ideal turbin uap yang berlaku di industri dengan efisiensi aktual turbin yang diperoleh dari hasil perhitungan penelitian.

- a. Efisiensi ideal turbin uap (45–60%)
- a) Merupakan standar umum di industri yang menunjukkan kisaran efisiensi optimal dari turbin uap.
 - b) Artinya, dalam kondisi normal, sebuah turbin uap yang bekerja baik mampu mengubah energi panas dari uap menjadi energi mekanik/ listrik dengan efisiensi minimal 45% hingga maksimal 60%.
- b. Efisiensi turbin aktual (23,39%)
- a) Hasil pengukuran dan perhitungan menunjukkan efisiensi turbin jauh di bawah standar.
 - b) Nilai ini hanya sekitar setengah dari batas bawah efisiensi ideal, sehingga turbin dapat dikategorikan tidak efisien.

Dengan hasil tabel 4.5 ini, turbin dikategorikan sebagai tidak efisien jika dibandingkan dengan performa optimal. Hal ini memerlukan pemeriksaan lebih lanjut terhadap sistem secara menyeluruh.

4.6.4 Faktor-Faktor Penyebab Efisiensi Rendah

Tabel 4. 6 Penyebab Efisiensi Rendah

Faktor	Penjelasan Teknis
Kondisi bearing	Gesekan tinggi akibat pelumasan yang tidak optimal, menyebabkan rugi mekanis yang mengurangi daya efektif.
Uap tidak ideal	Jika kualitas uap mengandung kelembapan, sudu bisa terkikis dan efisiensi ekspansi menurun.
Nozzle dan sudu aus	Aliran uap menjadi tidak optimal karena bentuk sudu yang berubah akibat erosi atau penumpukan kotoran.
Ketidakseimbangan rotor	Vibrasi tinggi dan ketidak sejajaran poros menyebabkan energi terbuang sebagai gerakan yang tidak produktif.

Pada tabel 4.6 menjelaskan bahwa rendahnya efisiensi turbin bukan hanya dipengaruhi oleh kualitas uap, tetapi juga faktor mekanis seperti kondisi bearing, keausan sudu, dan keseimbangan rotor. Semua faktor tersebut saling berkaitan dan jika tidak ditangani, akan mengakibatkan penurunan daya listrik yang dihasilkan serta meningkatnya biaya perawatan.

4.6.5 Dampak Efisiensi Rendah terhadap Sistem

Efisiensi turbin yang rendah memberikan dampak signifikan terhadap sistem pembangkit secara keseluruhan. Kondisi ini menyebabkan konsumsi energi menjadi lebih tinggi karena energi panas yang tersedia tidak dimanfaatkan secara optimal untuk menghasilkan daya mekanik. Akibatnya, bahan bakar yang digunakan juga meningkat sehingga menimbulkan pemborosan biaya operasional. Selain itu, turbin dengan efisiensi rendah harus bekerja lebih keras untuk memenuhi kebutuhan daya, sehingga mempercepat keausan komponen, meningkatkan frekuensi perawatan, serta memperpendek umur pakai peralatan. Jika dibiarkan, kondisi ini dapat menurunkan keandalan sistem pembangkit dan mengganggu kontinuitas produksi. Oleh karena itu, langkah perbaikan yang bersifat teknis maupun operasional sangat diperlukan agar turbin dapat kembali bekerja secara optimal dan efisien.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data vibrasi dan performa keluaran daya listrik pada turbin uap, serta studi literatur dan observasi lapangan yang telah dilakukan, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Tingkat vibrasi memiliki pengaruh signifikan terhadap performa operasional turbin uap dan setiap kenaikan vibrasi 1 mm/s akan menurunkan daya sebesar 0.4437 MW.
2. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa efisiensi termal aktual turbin uap sebesar **23,39%**. Nilai ini tergolong rendah jika dibandingkan dengan standar efisiensi ideal industri turbin uap, yang berkisar antara **45% hingga 60%**. Hal ini menandakan adanya potensi kehilangan energi yang signifikan dalam sistem, baik akibat proses termodinamika yang tidak optimal, maupun kondisi teknis pada unit turbin.
3. Dibandingkan dengan standar umum industri, baik dari segi efisiensi maupun batas toleransi getaran (berdasarkan ISO 10816), kondisi turbin yang dianalisis berada di bawah performa optimal. Hal ini menunjukkan perlunya evaluasi mendalam terhadap sistem operasi dan pemeliharaan turbin agar keandalan dan efisiensinya dapat ditingkatkan.

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan di atas, beberapa saran yang dapat diberikan untuk meningkatkan keandalan, efisiensi, dan keselamatan operasional turbin uap adalah sebagai berikut:

1. Implementasi sistem pemantauan vibrasi secara online (real-time vibration monitoring system).

Pemasangan sensor akselerometer permanen pada bearing depan dan belakang, serta pada casing turbin, memungkinkan pemantauan kontinu terhadap level getaran. Data ini dapat langsung ditampilkan pada sistem

SCADA atau DCS, sehingga operator dapat mendeteksi anomali lebih awal dan mencegah kerusakan.

2. Melakukan analisis vibrasi lanjutan seperti FFT (Fast Fourier Transform) dan orbit plot secara rutin.

Analisis ini penting untuk mengidentifikasi jenis gangguan spesifik, seperti:

- a. *Unbalance* (ketidakseimbangan massa),
- b. *Misalignment* (ketidaksejajaran poros),
- c. *Looseness* (kelonggaran mekanis),
- d. *Bearing defect* (cacat pada bantalan).

Dengan demikian, perbaikan dapat diarahkan secara lebih tepat.

3. Melakukan pengecekan dan perawatan sistem pelumasan secara berkala.

Termasuk:

- a. Pengecekan kualitas oli (viskositas, kontaminasi, kandungan logam),
- b. Pemeriksaan aliran dan tekanan pompa oli,
- c. Penggantian filter secara rutin.

Kualitas pelumasan yang baik akan sangat membantu dalam menekan getaran dan menjaga suhu kerja sistem tetap stabil.

4. Evaluasi Efisiensi Secara Periodik:

Hitung efisiensi bulanan berdasarkan data aktual untuk mendeteksi penurunan performa.

DAFTAR PUSTAKA

- Barik, Z. A., & Handaja, S. (2023). Studi penyebab dan penanganan fail detection pada shinkawa vibration sensors unit circulating water pump di PT. X menggunakan metode root cause failure analysis. *Jurnal Eltek*, 21(2), 101–108. <https://doi.org/10.33795/eltek.v21i2.4610>
- Berahmana, K. S. (2021). Analisis Getaran Pada Aliran Pipa Akibat Pemasangan Turbine Propeller. *AME (Aplikasi Mekanika Dan Energi): Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 7(1), 9. <https://doi.org/10.32832/ame.v7i1.3667>
- Conny K Wachjoe, & Metius Zingiber Sianturi. (2020). Dampak Vibrasi Mekanik Terhadap Konsumsi Listrik Motor Induksi Pompa Air Pendingin. *Jurnal Teknik Energi*, 3(1), 204–209. <https://doi.org/10.35313/energi.v3i1.1768>
- Erapabrianto, E., Badaruddin, B., & Heryanto, H. (2019). Analisis Penyebab Vibrasi Abnormal Generator PLTG 4.1 PADA PT.PJB Unit Pembangkitan Muara Tawar. *Jurnal Teknologi Elektro*, 10(2), 137. <https://doi.org/10.22441/jte.v10i2.008>
- Fakhrur, M., Nasution, R., Anisah, S., Syahputra, M. R., Program, D., & Teknik, S. (n.d.). *Analisis Pengaruh Getaran Tinggi Terhadap Motor Induksi 380 Volt Belt Conveyor Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap 2X200 Mw Pangkalan Susu Analysis of the Effect of High Vibration on 380 Volt Belt Conveyor Induction Motor in 2X200 Mw Power.*
- Gede Eka Lesmana, I., Chairunisa, F., Hartanto, M. P., & Rovida Camalia, H. (2022). Pengaruh Getaran Pompa Terhadap Aliran Fluida pada Proses Pemipaan Skala Laboratorium Analysis of the Effect of Pumps Vibration on Piping Process Fluid Flow in Laboratory Scale. *Jurnal Asimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa Dan Inovasi Analisis*, 4, 201–208.
- IB.P.P.Mahartana dan Harus Laksana Guntur. (2017). *Unbalance Rotor Steam Turbine Unit 1 PLTU Amurang 2x25MW*. 6(1).
- Isranuri, I., Michael, & Sabri, M. (2019). Analisa Data Vibrasi Untuk Mengidentifikasi Kondisi dan Syptom Pada Generator Turbin Gas Siemens V 94.2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *Dinamis*, 7(3), 10. <https://doi.org/10.32734/dinamis.v7i3.7193>
- Iswahyudi, Y. (2020). Analisis Pengaruh Vibrasi Terhadap Performa Boiler

- Feedwater Pump (Bfp) 3B Pltu Asam Asam. *Jtam Rotary*, 2(2), 235. https://doi.org/10.20527/jtam_rotary.v2i2.2418
- JASMINE, K. (2014). 濟無No Title No Title No Title. *Penambahan Natrium Benzoat Dan Kalium Sorbat (Antiinversi) Dan Kecepatan Pengadukan Sebagai Upaya Penghambatan Reaksi Inversi Pada Nira Tebu*.
- Ohoirenan, W., Rettob, E. A., & Rombekila, A. (2022). Pengaruh Vibrasi Terhadap Daya Mesin Diesel SWD 6TM 410 RR. *Jurnal Sosial Dan Teknologi Terapan AMATA*, 1(2), 29–34. <https://doi.org/10.55334/sostek.v1i2.328>
- Rizky, D., & Wibawaputra, A. (2024). *Analisis Spektrum Vibrasi Pada Motor Cooling Tower 2 di WHRS PT . Cemindo Gemilang Bayah Analisis Spektrum Vibrasi Pada Motor Cooling Tower 2 di WHRS PT . Cemindo Gemilang Bayah Oleh :*
- Setyawan, H. P., & Suryadi, D. (2018). Analisis Karakteristik Vibrasi pada Paper Dryer Machine untuk Deteksi Dini Kerusakan Spherical Roller Bearing. *Rotasi*, 20(2), 110. <https://doi.org/10.14710/rotasi.20.2.110-117>
- Sinyal, A., Untuk, V., Kerusakan, M., Teknik, F., Surabaya, U. N., Teknik, F., & Surabaya, U. N. (n.d.). *Abid Muhammad Alfath*.
- Situmorang, E. S., Suryadi, D., & Alparisi, A. S. (2023). *ANALISIS KERUSAKAN PADA TURBIN DENGAN METODE VIBRATION ANALYSIS Failure Analysis of Turbine with Vibration Analysis Method*. 7(1), 27–35.
- Waskito, P., & Hasibuan, A. S. (2016). *Kajian Lintasan Orbit pada Turbin Angin Savonius Tipe Rotor U dan Helix dengan Menggunakan Software MATLAB*. 245–255.
- Bently, D.E., Hatch, C.T. (2002). *Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics*. Bently Pressurized Bearing Press.
- Randall, R. B. (2011). *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. Wiley.
- Harris, C. M., & Piersol, A. G. (2002). *Harris' Shock and Vibration Handbook*. McGraw-Hill.
- Fluke Corporation. (2020). *Vibration Testing Applications and Technology*. ISO 10816-3:2019 – Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts.

LAMPIRAN





DAFTAR RIWAYAT HIDUP



DATA PRIBADI

Nama : Surya Dharma
Tempat, Tanggal Lahir : Tanjung Keliling, 08 Januari 2001
Jenis Kelamin : Laki-laki
Agama : Islam
Alamat : Desa Suka mulia Perk.Tj Keliling, Kecamatan Salapian, Kabupaten Langkat
Nomor Telepon : 082258699515
E-mail : Sdharma890@gmail.com

PENDIDIKAN FORMAL

Tahun 2006-2012 : SD Negeri 053958 Sidomulyo
Tahun 2012-2015 : SMP Negeri 1 Salapian
Tahun 2015-2018 : SMA Negeri 1 Kuala
Tahun 2021-2025 : Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara