

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Yang Relevan

Dalam penelitian ini teori yang relevan menjadi salah satu bagian dari perolehan referensi tambahan guna memperkuat serta membantu peneliti dalam memperoleh informasi terkait pola getaran turbin, deteksi dini terhadap gangguan di PLTU. Berikut beberapa hasil penelitian terdahulu :

1. Pada jurnal ilmiah yang diterbitkan pada tahun 2022 dengan judul “Penanganan Lonjakan Vibrasi Pada Rotor Elektrik Turbin di PLTU Gresik”. Dalam penelitian ini peneliti melakukan analisa terhadap getaran pada rotor turbin dengan menggunakan alat ukur yang mengevaluasi domain amplitudo, waktu, dan frekuensi dari sinyal getaran. Penelitian ini dilakukan karena terdapat peningkatan amplitudo pada pengukuran kedua yang mencapai 115 μm pada 3000 rpm serta kerusakan pada rotor akibat getaran. Untuk mengatasi masalah yang ditemukan, digunakan metode *Root Cause Analysis* yang berfungsi untuk mengidentifikasi sebab dan akibat dari suatu permasalahan. Hasil penelitian menunjukkan adanya *short turn to turn* pada lilitan rotor yang menyebabkan vibrasi elektrik, sehingga diperlukan perbaikan untuk mengatasi gangguan getaran tersebut. [1]
2. Pada jurnal ilmiah yang diterbitkan pada tahun 2022 dengan judul “*Artificial intelligence based operational strategy development and implementation for vibration reduction of a supercritical steam turbine shaft bearing*”. Dalam penelitian ini peneliti melakukan analisa terhadap getaran turbin dimana getaran pada turbin uap merupakan salah satu faktor utama dalam menentukan keandalan operasi pada turbin hingga pengaruh terhadap operasional pembangkit. Hasil dari penelitian ini adalah peneliti menerapkan penggunaan *Artificial Intelligence* (ANN & SVM) untuk memodelkan getaran, dengan strategi ini getaran pada turbin mengalami penurunan getaran sekitar 4.07% di bawah batasa alarm. [2]

3. Pada jurnal ilmiah yang diterbitkan pada tahun 2022 dengan judul “*The Development of A Reliability Evaluation Application for Power Plant Steam Turbine Vibrations to Predict It's Failure*”. Dalam penelitian ini peneliti melakukan analisa terhadap keandalan getaran turbin uap untuk memprediksi kegagalannya. Penelitian ini menggunakan aplikasi evaluasi untuk melakukan analisa keandalan dan getaran pada turbin. Hasil dari penelitian ini adalah frekuensi dominan getaran sekitar 1 Hz dan berada dibawahnya, frekuensi alami bernilai 13,91 Hz. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi getaran jauh dari nilai frekuensi alami yang dihasilkan sehingga kondisi turbin uap dalam kondisi normal. [3]
4. Pada jurnal ilmiah yang diterbitkan pada tahun 2025 dengan judul “Analisa Kerusakan *Thrust Bearing* Turbin Pengaruh Kinerja Pelumas Di PLTU PT. PLN NP UP Belawan”. Dalam penelitian ini peneliti melakukan analisa terhadap penyebab kerusakan pada *Thrust Bearing* turbin akibat kinerja sistem pelumas yang kurang baik. Penelitian ini melakukan pengujian pada pelumas turbin untuk mengecek kualitas dari pelumas dan pengujian ini juga bisa mengetahui berapa lama pelumas dapat digunakan dan dapat mengetahui keadaan yang terjadi pada turbin. Hasil dari penelitian ini adalah untuk menjaga kualitas pelumas perlu dilakukan proses pengiriman, penurunan dan proses penyimpanan yang baik dan tepat serta bantalan aksial yang menopang rotor turbin mengalami kegagalan sehingga mempengaruhi komponen lainnya mengalami kerusakan. Faktor yang menimbulkan kegagalan tersebut akibat getaran yang melebihi batas toleransi sehingga terjadi *rubbing* antara sisi yang berputar dan sisi yang diam. [4]
5. Pada jurnal ilmiah yang diterbitkan pada tahun 2022 dengan judul “Analisis Getaran Bantalan Pada Turbin Uap”. Dalam penelitian ini peneliti melakukan analisa terhadap getaran bantalan pada turbin uap, dikarenakan munculnya indikasi ketidakseimbangan, keausan bantalan dan ketidaksejajaran sudut pada bantalan 1 begitupun bantalan 2,3 dan 4 dengan faktor permasalahannya masing-masing. Hasil dari penelitian ini adalah sistem bantalan pada turbin uap mengalami peningkatan

getaran hingga tiga kali lipat dari batas normal dengan nilai 51,14 m-PP dan menunjukkan adanya ketidakseimbangan, keausan bantalan, dan sudut. [6]

6. Pada jurnal ilmiah yang diterbitkan pada tahun 2024 dengan judul “*Vibration Characteristics and Life Prediction of Last Stage Blade in Steam Turbine Based on Wet Steam Model*”. Dalam penelitian ini peneliti melakukan analisa terhadap karakteristik getaran yang terjadi pada sudu tahap akhir turbin uap serta melakukan prediksi batas penggunaan komponen untuk dapat mempertimbangkan pengaruh kondisi uap basah. Hasil dari penelitian ini adalah menunjukkan bahwasannya bagian pada sisi ujung *blade* merupakan area paling rawan kerusakan serta uap basah dapat mempercepat peningkatan tegangan sehingga memberikan faktor pada umur penggunaan *blade*. [7]
7. Pada jurnal ilmiah yang diterbitkan pada tahun 2024 dengan judul “*The Instigating Factors Behind The Occurrence Of Vibration In Steam Turbines A Review Analysis*”. Dalam penelitian ini peneliti melakukan analisa terhadap faktor-faktor pendorong terjadinya getaran pada turbin uap. Pemantauan getaran sangat penting dalam mengidentifikasi kerusakan dalam operasi turbin karena turbin merupakan salah satu bagian utama yang memiliki pengaruh besar terhadap pembangkit. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini yaitu mengetahui faktor-faktor yang menyebabkan munculnya getaran pada turbin uap seperti terjadinya ketidakseimbangan pada rotor, ketidaksejajaran pada poros turbin, pengaruh aliran uap pada sudu turbin. [8]
8. Pada jurnal ilmiah yang diterbitkan pada tahun 2024 dengan judul “*Investigation of High Vibration Phenomena in Steam Turbine*”. Dalam penelitian ini peneliti melakukan analisa terhadap diagnosis menyeluruh terkait dengan permasalahan mendasar untuk mengurangi risiko getaran berlebih pada turbin uap serta perencanaan pemeliharaan dan tindakan korektif. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini dengan memanfaatkan 3 alat komponen utama sistem pemantauan yaitu sensor getaran, sistem *Bentley Nevada 3500* dan *ADRE 408* penyebab utama yang diidentifikasi adanya getaran yang tinggi dari ketidaksejajaran dan eksentrisitas tinggi poros antara turbin HP dan kompresor LP. [9]

9. Pada jurnal ilmiah yang diterbitkan pada tahun 2022 dengan judul “*Long-Short Term Memory And Gradient Boosting Model For Hydraulic System Predictive Maintenance*”. Dalam penelitian ini peneliti melakukan analisa terhadap sistem hidrolik yang merupakan sebuah sistem penggerak berbasis tekanan fluida karena gangguan yang terjadi pada tekanan fluida atau kebocoran kecil yang terjadi dapat menurunkan efisiensi daya secara drastis. Hasil dari penelitian ini dengan menggunakan model LSTM menghasilkan prediksi yang jauh lebih cepat dan akurat dibandingkan memasukan seluruh data mentah sensor tanpa diseleksi terlebih dahulu. Kombinasi antara LSTM dan *Gradient Boosting* terbukti sangat kokoh dalam memprediksi status kesehatan komponen internal sistem hidrolik. [10]
10. Pada jurnal ilmiah yang diterbitkan pada tahun 2024 dengan judul “Analisis Penyebab Efisiensi Daya Turbin Menurun”. Dalam penelitian ini peneliti melakukan analisa terhadap penyebab efisiensi daya turbin menurun. Hasil dari penelitian ini menunjukkan faktor penyebab menurunnya efisiensi daya pada turbin akibat korosi akibat kualitas uap yang disuplai oleh boiler kurang baik. Uap yang membawa partikel air (uap basah) bertemu dengan sudu-sudu turbin dengan kecepatan yang tinggi sehingga mengikis permukaan material dari sudu turbin secara perlahan. Selain korosi, adanya penumpukan kerak dan keausan pada komponen *wear* dan *tear*. [12]

Tabel 2.1 Merupakan penjelasan kembali terkait dengan penelitian yang relevan.

Tabel 2. 1 Penelitian Yang Relevan

No	Judul, Penulis dan Tahun	Hasil Penelitian	Kesenjangan
1.	Penanganan Lonjakan Vibrasi Pada Rotor Elektrik Turbin di PLTU Gresik;	Hasil dari penelitian menunjukkan adanya <i>short turn to turn</i> pada belitan rotor yang mengakibatkan getaran elektrik, sehingga	Pada penelitian ini, membahas mengenai metode penanggulangan lonjakan getaran pada rotor turbin listrik setelah

	Penulis: Abdul Ghofar Romdhon Dkk, 2022	diperlukan perbaikan untuk mengatasi masalah getaran tersebut.	terjadinya gangguan. Penelitian ini tidak menekankan pada cara untuk mencegah gangguan awal yang disebabkan oleh getaran pada turbin.
2.	<i>Artificial intelligence based operational strategy development and implementation for vibration reduction of a supercritical steam turbine shaft bearing;</i> Penulis: Waqar Muhammad Ashraf, Dkk, 2022	Hasil dari penelitian ini adalah peneliti menerapkan penggunaan <i>Artificial Intelligence</i> (ANN & SVM) untuk memodelkan getaran, dengan strategi ini getaran pada turbin mengalami penurunan getaran sekitar 4.07% di bawah batas alarm.	Pada penelitian ini memiliki tujuan untuk pengoptimalisasi getaran pada turbin dengan menerapkan AI. Tidak membahas terkait dengan analisis pola getaran untuk deteksi dini gangguan yang terjadi.
3.	<i>The Development of A Reliability Evaluation Application for Power Plant Steam Turbine Vibrations to Predict Its Failure;</i> Penulis: Moch. Faqih, Dkk, 2022	Hasil dari penelitian ini adalah frekuensi dominan getaran sekitar 1 Hz dan berada dibawahnya, frekuensi alami bernilai 13,91 Hz. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi getaran jauh dari nilai frekuensi alami yang dihasilkan sehingga kondisi turbin uap dalam kondisi normal.	Pada penellitian ini tidak membahas terkait dengan penggunaan data tren maupun pola getaran untuk deteksi dini gangguan pada turbin. Penelitian ini berfokus pada keandalan frekuensi.

4.	Analisa Kerusakan <i>Thrust Bearing</i> Turbin Pengaruh Kinerja Pelumas Di PLTU PT. PLN NP UP Belawan. Penulis: Irin Mayrini, Tomi Abdilah, Supriadi, 2025	Hasil dari penelitian ini adalah untuk memastikan standar pelumas tetap terjaga dan diperlukan metode pengiriman, penanganan, dan penyimpanan yang benar serta efektif. tepat serta bantalan aksial yang menopang rotor turbin mengalami kegagalan sehingga mempengaruhi komponen lainnya mengalami kerusakan.	Pada penelitian ini berfokus pada pengaruhnya sistem pelumasan terhadap <i>thrust bearing</i> . Memiliki perbedaan dengan penelitian saya, karena tidak berfokus pada vibrasi untuk dapat mendeteksi faktor kerusakan pada turbin.
5.	Analisis Getaran Bantalan Pada Turbin Uap; Penulis: Riasal Abu, Afdal, 2022	Hasil dari penelitian ini adalah sistem bantalan pada turbin uap mengalami peningkatan getaran hingga tiga kali lipat dari batas normal dengan nilai 51,14 m-PP dan menunjukkan adanya ketidakseimbangan, keausan bantalan, dan sudut.	Pada penelitian ini berfokus pada faktor-faktor penyebab terjadinya getaran pada turbin dan langkah-langkah yang benar dalam pemeliharaan turbin tidak berfokus pada pola getaran untuk melakukan deteksi dini gangguan pada turbin.
6.	<i>Vibration Characteristics and Life Prediction of Last Stage Blade in Steam</i>	Hasil dari penelitian ini adalah menunjukkan bahwasannya bagian pada sisi ujung <i>blade</i> merupakan	Pada penelitian ini memiliki fokus pada penyebab terjadinya getaran mempengaruhi

	<i>Turbine Based on Wet Steam Model;</i> Penulis: Pengfei Hu, Dkk, 2024	area paling rawan kerusakan serta uap basah dapat mempercepat peningkatan tegangan sehingga memberikan faktor pada umur penggunaan <i>blade</i>.	penggunaan <i>blade</i> dan uap basah, hanya berfokus pada <i>blade</i> tidak secara keseluruhan dari vibrasi.
7.	<i>The Instigating Factors Behind The Occurrence Of Vibration In Steam Turbines A Review Analysis;</i> Penulis: Vladimir B. Z, Dkk, 2024	Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah mengetahui faktor-faktor yang menyebabkan munculnya getaran pada turbin uap seperti terjadinya ketidakseimbangan pada rotor, ketidaksejajaran pada poros turbin, pengaruh aliran uap pada sudu turbin.	Membahas mengenai faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya getaran pada turbin. Tidak berfokus pada deteksi dini gangguan yang terjadi akibat lonjakan getaran pada turbin.
8.	<i>Investigation of High Vibration Phenomena in Steam Turbine;</i> Penulis: Zeshan Ali, Dkk, 2024	Hasil yang diperoleh dari penelitian ini dengan memanfaatkan 3 alat komponen utama sistem pemantauan yaitu sensor getaran, sistem <i>Bentely Nevada 3500</i> dan <i>ADRE 408</i> penyebab utama yang diidentifikasi adanya	Pada penelitian ini menggunakan beberapa metode untuk memantau terjadinya getaran seperti sensor getaran, tidak menganalisis gangguan apa yang terjadi akibat lonjakan vibrasi pada turbin dan bisa menjadi indikator

		getaran yang tinggi dari ketidaksejajaran dan eksentrisitas tinggi poros anatar turbin HP dan kompresor LP.	dilakukannya pemeliharaan prediktif.
9.	<i>Long-Short Term Memory And Gradient Boosting Model For Hydraulic System Predictive Maintenance;</i> Penulis: Sahrul, Sabila Hadinnisa, Dkk, 2022	Hasil dari penelitian ini dengan menggunakan model LSTM menghasilkan prediksi yang jauh lebih cepat dan akurat dibandingkan memasukan seluruh data mentah sensor tanpa diseleksi terlebih dahulu. Kombinasi antara LSTM dan <i>Gradient Boosting</i> terbukti sangat kokoh dalam memprediksi status kesehatan komponen internal sistem hidrolik.	Pada penelitian ini menggunakan kombinasi model LSTM dan <i>Gradient Boosting</i> untuk memprediksi status kesehatan komponen internal pada sistem hidrolik.
10.	Analisis Penyebab Efisiensi Daya Turbin Menurun; Penulis: Ricky Kurniawan, Ali Akbar, 2024	Hasil dari penelitian ini menunjukkan faktor penyebab menurunnya efisiensi daya pada turbin akibat korosi akibat kualitas uap yang disuplai oleh boiler kurang baik. Uap yang membawa partikel air (uap basah)	Pada penelitian ini memiliki fokus pada penyebab menurunnya efisiensi daya turbin sedangkan penelitian saya membahas mengenai bagaimana cara memberikan indikasi dini

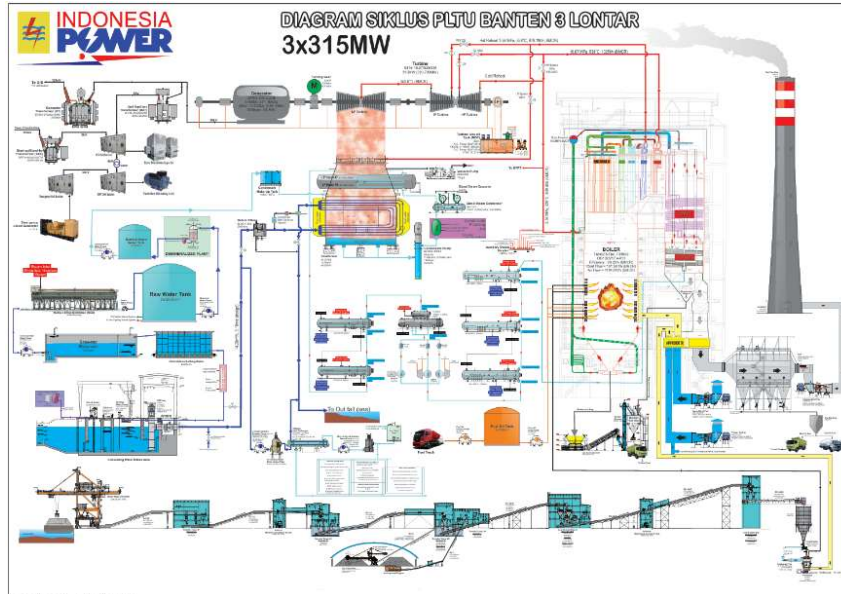
		bertemu dengan sudu-sudu turbin dengan kecepatan yang tinggi sehingga mengikis permukaan material dari sudu turbin secara perlahan. Selain korosi, adanya penumpukan kerak dan keausan pada komponen <i>wear</i> dan <i>tear</i> .	gangguan yang terjadi pada vibrasi turbin.
--	--	--	--

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu tipe pembangkit yang memproduksi daya listrik paling besar di Indonesia. PLTU menggunakan energi kinetik dari uap untuk mengubahnya menjadi energi listrik. Komponen utama dalam tipe pembangkit ini adalah generator yang berfungsi menghasilkan listrik, sementara turbin uap yang terhubung langsung dengan generator berperan sebagai mesin penggerak. Pembangkit listrik ini memanfaatkan batu bara sebagai sumber bahan bakar.

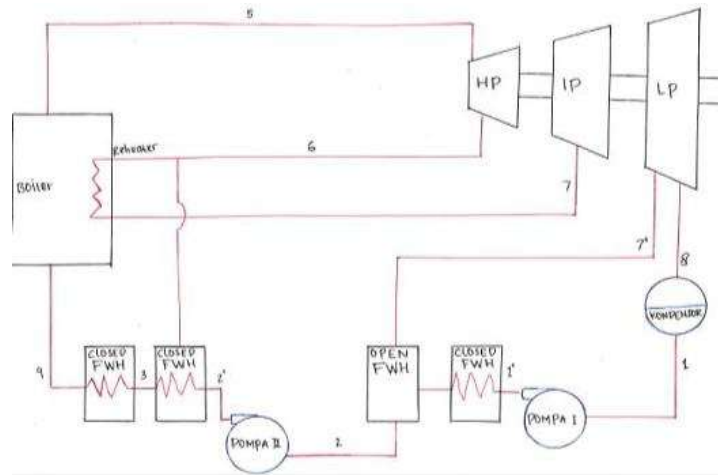
Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) memiliki mekanisme kerja yang umumnya terbagi menjadi empat bagian utama, yaitu sistem air, sistem bahan bakar, sistem udara, dan sistem gas buang, serta sistem uap, seperti yang dapat dilihat pada gambar di bawah. Gambar 2.1 merupakan penjelasan terkait dengan siklus PLTU Banten 3 Lontar.



Gambar 2. 1 Siklus PLTU Banten 3 Lontar

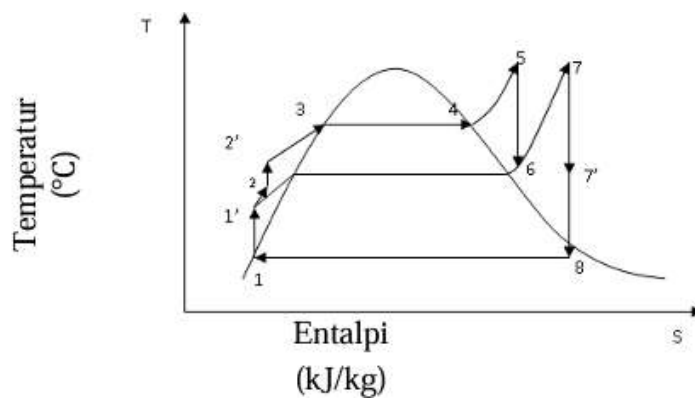
Siklus *Rankine* untuk pembangkit PT. PLN Indonesia Power UBP Banten 3 Lontar, merupakan siklus yang dilengkapi dengan pemanasan ulang yang berlangsung di *reheater boiler* dan siklus *Rankine* dengan sistem regeneratif terjadi di *economizer*. Diagram T-S untuk PT. PLN Indonesia Power UBP Banten 3 Lontar dapat digambarkan sebagai berikut: [13] Pada gambar 2.2 dua menunjukkan siklus *renkine regenerative* di PLTU UBP Banten

3 Lontar dan gambar 2.3 menunjukkan T-S siklus *rankine regenerative* di PLTU UBP Banten 3 Lontar.



Gambar 2. 2 Siklus Rankine Regenerative di PLTU UBP Banten 3 Lontar

Pada gambar 2.2 menunjukkan tahapan cara kerja siklus *rankine regenerative* di PLTU UBP Banten 3 Lontar dan pada gambar 2.3 menunjukkan T-S cara kerja siklus *rankine regenerative* di PLTU UBP Banten 3 Lontar. Dari kedua gambar tersebut menjelaskan siklus *renkine regenerative* dari kondensor hingga pada *reheater*.



Gambar 2. 3 T-S Siklus Rankine Regenerative di PLTU UBP Banten 3 Lontar

Keterangan Gambar [13]:

1. Proses 1-1' : Peningkatan tekanan pada air menggunakan *condensate extraction pump*.
2. Proses 1'-2 : Pemanasan air *low pressure heater*.
3. Proses 2-2' : Peningkatan tekanan air menggunakan *boiler feed pump*.
4. Proses 2'-3 : Pemanasan air pada *high pressure heater* dan pada *economizer*.
5. Proses 3-4 : Pemanasan air menjadi uap air pada *wall tube* dan *downcomer* di dalam boiler.
6. Proses 4-5 : Pemanasan uap air menjadi uap panas lanjut (*superheated steam*) pada *superheater*.
7. Proses 5-6 : Proses ekspansi di dalam *high pressure turbine*.
8. Proses 6-7 : Pemanasan Kembali uap yang keluar dari *high pressure turbine* yang terjadi dalam *reheater*.
9. Proses 7-7' : Ekspansi uap yang keluar dari *reheater* di dalam *intermediate pressure turbine*.
10. Proses 7'-8 : Ekspansi uap di dalam *low pressure turbine* tanpa mengalami pemanasan.
11. Proses 8-1 : Pendinginan uap menjadi air di dalam *condenser*.

2.2.2 Turbin Uap

Turbin uap adalah alat yang mengubah energi yang terkandung dalam uap menjadi energi putaran. Uap yang bertekanan dan bersuhu tinggi diarahkan untuk mendorong bilah-bilah pada turbin yang terpasang di poros, sehingga poros turbin dapat berputar. Poros ini terhubung dengan poros generator untuk memproduksi listrik. Dalam sistem pembangkit listrik berbasis uap, turbin memainkan peran penting karena berfungsi mengubah energi panas dalam uap menjadi energi mekanik pada poros, yang selanjutnya diubah menjadi energi listrik melalui generator. Agar turbin dapat beroperasi secara efisien, turbin harus berjalan dengan putaran yang stabil atau sesuai dengan standar yang diperlukan, dan dengan getaran yang sekecil mungkin. Namun, dalam praktiknya, sering kali muncul getaran yang disebabkan oleh interaksi antara bagian mekanis dan aliran fluida.

Getaran pada turbin uap dapat berdampak pada kinerja dan keandalan mesin. Getaran yang terjadi dalam batas normal biasanya tidak berbahaya bagi turbin. Namun, jika tingkat getaran melebihi batas yang ditentukan di suatu unit atau pembangkit, hal ini dapat menimbulkan masalah serius pada turbin. Salah satu dampak utama dari getaran berlebih adalah berkurangnya efisiensi turbin. Energi yang seharusnya diubah menjadi energi mekanik justru hilang sebagai osilasi mekanik dan panas akibat gesekan. Hal ini menyebabkan daya keluaran turbin lebih rendah dibandingkan dengan kondisi ideal. Selain itu, getaran yang berlebihan dapat mempercepat kerusakan komponen seperti *bearing*, rotor, dan bilah turbin. Jika getaran berlangsung lama, kerusakan yang terjadi bisa bersifat permanen.

Pada turbin uap, berat beban berpengaruh besar terhadap jumlah uap yang dihasilkan. Ketika beban yang diberikan tinggi, maka uap yang dibutuhkan juga banyak, dan sebaliknya, jika beban kecil, maka uap yang dibutuhkan pun sedikit. Aliran uap yang masuk ke dalam turbin diatur oleh katup kontrol yang beroperasi secara otomatis. Di PT. PLN Indonesia Power UBP Banten 3 Lontar, terdapat tiga tingkat pengaturan yaitu [13]:

1. Turbin Tekanan Rendah (*High Pressure Turbine*)
2. Turbine Tekanan Menengah (*Intermediate Pressure Turbine*)
3. Turbine Tekanan Rendah (*Low Pressure Turbine*)

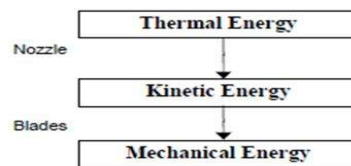
Pada gambar 2.4 merupakan turbin uap pada PLTU UBP Banten 3 Lontar.



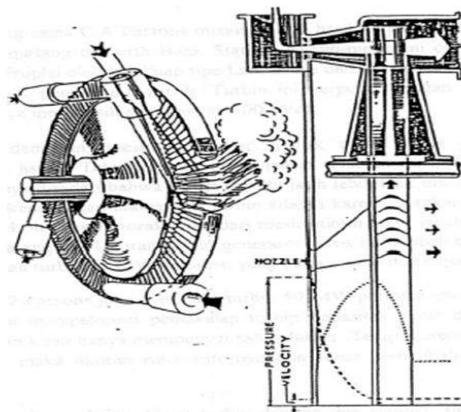
Gambar 2. 4 Turbin Uap

2.2.2.1 Prinsip Kerja Turbin Uap

Prinsip dasar dari turbin uap adalah uap kering yang diproduksi oleh pemanas tambahan dengan suhu dan tekanan tinggi yang dialirkan ke dalam turbin dengan tekanan yang tinggi. Di dalam turbin, terdapat sudu tetap dan sudu bergerak yang dipasang secara bergantian. Sudu tetap diletakkan di sekeliling bagian dalam turbin, sedangkan sudu bergerak dipasang pada rotor untuk memungkinkan uap melebar. Energi dari uap yang diterima oleh sudu-sudu turbin dimanfaatkan untuk memutar poros turbin. Pada tahap ini, terjadi perubahan energi, sehingga suhu uap menurun. Selanjutnya, uap tersebut masuk ke turbin tekanan menengah yang akan menggerakkan sudu-sudu turbin tekanan menengah (*intermediate pressure turbine*) dan sudu-sudu turbin tekanan rendah (*low pressure turbine*), hasil dari gerakan sudu-sudu ini akan memperkuat rotasi poros turbin, sehingga energi mekanik yang dihasilkan dapat digunakan untuk memutar generator. Pada gambar 2.5 merupakan ilustrasi prinsip kerja dari turbin uap.



Gambar 6. Konversi energi didalam turbin



Gambar 2. 5 Prinsip Kerja Turbin Uap

2.2.2.2 Bagian Utama Turbin Uap

Turbin uap merupakan perangkat yang mengubah energi dengan cara mengubah energi panas yang ada dalam uap menjadi energi rotasi. Uap yang berada pada tekanan dan suhu tinggi digunakan untuk mendorong bilah-bilah turbin yang terpasang pada poros, yang memungkinkan poros turbin berputar. Poros turbin ini terhubung dengan poros generator sehingga dapat menghasilkan aliran listrik. Untuk memastikan turbin beroperasi secara efektif, terdapat beberapa komponen utama yang saling terhubung, yaitu sebagai berikut:

1. Rotor

Rotor adalah bagian yang berputar terdiri dari poros dan sudu-sudu yang bergerak terpasang mengelilingi rotor. Jumlah baris sudu yang bergerak pada rotor sama dengan jumlah baris sudu yang diam pada *casing*. Pasangan antara sudu diam dengan sudu gerak disebut dengan Tingkat (*stage*). Sudu yang bergerak (rotor) digunakan untuk mengkonversi energi kinetik dari uap menjadi energi mekanik, pada komponen turbin yang berputar yang terdiri dari poros dan bilah turbin. Pada gambar 2.6 merupakan bagian pada turbin yaitu rotor.



Gambar 2. 6 Rotor

2. *Casing*

Casing turbin adalah pelindung turbin yang berfungsi untuk melindungi sudu-sudu dan sebagai tempat untuk menempatkan komponen-komponen turbin. *Casing* pada turbin adalah bagian yang tidak bergerak yang dikenal sebagai stator, yang dipasang secara melingkar dan tersusun dalam beberapa baris, yang merupakan pasangan

untuk sudu yang bergerak di rotor. Sudu yang tetap berperan untuk mengarahkan aliran uap dengan tepat agar dapat mendorong sudu yang bergerak pada rotor. Pada gambar 2.7 proteksi visual pada turbin yang disebut dengan *casing*.



Gambar 2. 7 *Casing*

3. *Nozzle*

Nozzle pada turbin uap memiliki peran untuk mengubah energi panas dan tekanan tinggi yang berasal dari uap yang diciptakan oleh boiler menjadi energi bergerak. Uap yang dihasilkan kemudian mengalir ke bilah-bilah turbin, yang menyebabkan rotor berputar. Pada gambar 2.8 merupakan bagain pada turbin uap yang disebut dengan *nozzle*.

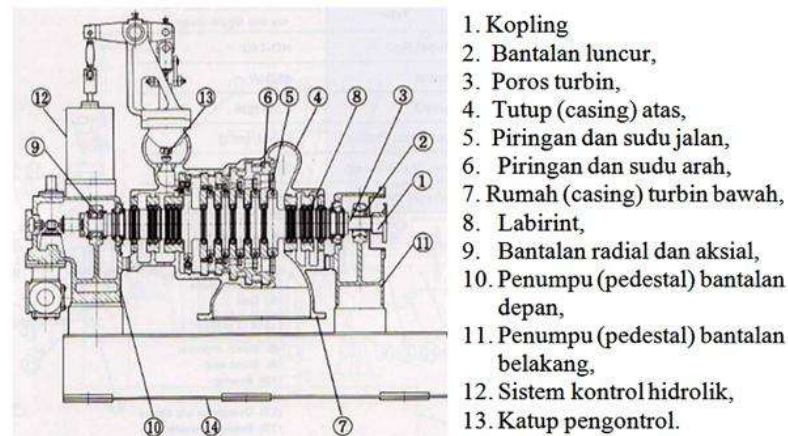


Gambar 2. 8 *Nozzle*

4. *Bearing*

Bearing pada turbin uap berfungsi untuk menahan rotor, yang secara aksial menopang berat rotor dan menghadapi berbagai gaya tidak stabil dari uap air yang berinteraksi dengan bilah turbin. Tipe *bearing* yang digunakan dalam rancangan turbin uap terdiri

dari *thrust bearing*, *journal bearing*, dan kombinasi dari kedua jenis bantalan tersebut. Selain itu, bantalan pada turbin juga memerlukan sistem pelumasan dengan oli agar dapat menghindari gesekan antara poros turbin dan bantalan. Pada gambar 2.9 menunjukkan bagian-bagian pada turbin uap.



Gambar 2. 9 Bagian Turbin Uap

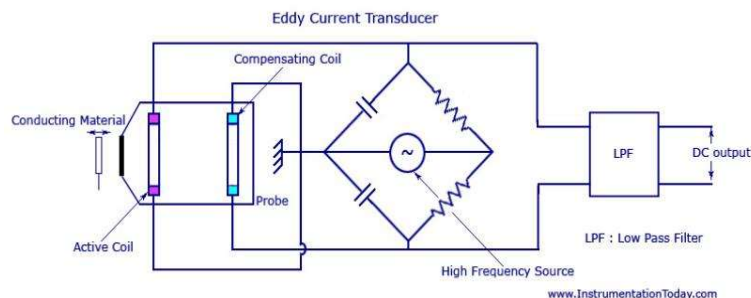
2.2.3 Getaran (*Vibration*)

Vibrasi adalah salah satu parameter utama yang sangat berperan penting dalam turbin. Vibrasi merujuk pada pergerakan suatu massa atau objek dari posisi diam. Dalam pengertian visual, vibrasi adalah gerakan bolak-balik yang dihasilkan oleh mesin yang dapat dirasakan baik dengan tangan maupun oleh seluruh tubuh kita yang dikenal sebagai getaran. Vibrasi yang berlebihan dapat menjadi tanda adanya masalah pada kinerja mesin. Jika tren vibrasi terus meningkat dan jika dibiarkan, hal ini dapat mengakibatkan kerusakan yang lebih serius atau bahkan kerusakan yang fatal, yang pada akhirnya meningkatkan biaya pemeliharaan. Untuk memastikan daya tahan mesin agar beroperasi dengan baik, salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan menerapkan sistem pemantauan dan perlindungan terhadap pembacaan vibrasi pada mesin tersebut.

2.2.3.1 Jenis-jenis Sensor getaran (*Vibration*) Pada Turbin Uap

1. Prinsip Kerja Sensor *Displacement*

Sensor vibrasi jenis ini bekerja dengan menerapkan prinsip *proximity eddy current* yang dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Pada gambar 2.10 menunjukkan prinsip kerja sensor *displacement*.



Gambar 2. 10 Prinsip Kerja Sensor *Displacement*

Prinsip kerja *proximity eddy current* bekerja dengan memanfaatkan perubahan impedansi kumparan akibat pembentukan arus *eddy* pada material konduktif. Dimana sinyal AC dengan frekuensi tinggi yang dihasilkan dari *high frequency source* dialirkan pada *active coil* pada probe, apabila semakin dekat *conducting material*, maka semakin besar arus *eddy* yang dihasilkan dan perubahan impedansi akan semakin besar. Perubahan jarak antara probe dengan *conducting material* akan menyebabkan perubahan arus *eddy* yang terdeteksi.

Sensor *displacement* terbagi menjadi dua bagian yaitu, bagian *shaft vibration* dan *axial displacement*.

a) *Shaft Vibration*

Sensor getaran pada turbin berfungsi untuk memantau getaran yang terjadi pada poros dan *housing bearing turbine*. Sensor vibrasi pada bagian *shaft vibration* dipasang pada posisi sebelah luar *bearing* dan menghadap langsung ke poros turbin. Sensor vibrasi jenis ini bekerja secara *non contact* dengan cara menerapkan prinsip *eddy current* untuk mengukur perubahan jarak (*gap*) antara sensor dengan

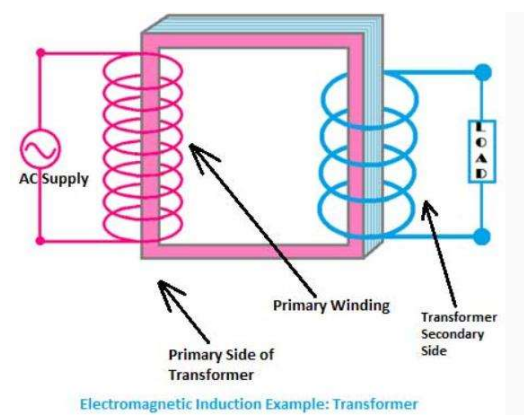
poros turbin akibat terjadinya getaran. Sensor vibrasi *displacement* digunakan untuk memantau getaran pada poros turbin secara *real time* dan memberikan peringatan pada modul TSI apabila terjadi peningkatan getaran yang tidak normal.

b) *Axial Vibration*

Axial displacement dipasang pada posisi sebelah luar *bearing* diantara IP dan LP. Sensor vibrasi jenis ini bekerja secara *non contact* dengan cara menerapkan prinsip *eddy current* untuk mengukur pergerakan antara sensor dengan poros turbin akibat terjadinya getaran. Sensor *axial displacement* digunakan untuk memantau getaran pada poros turbin akibat perubahan posisi pada poros turbin secara *real time* dan memberikan peringatan pada modul TSI apabila terjadi peningkatan getaran yang tidak normal.

2. Prinsip Kerja Sensor *Velocity*

Sensor vibrasi *velocity* dipasang pada posisi *housing bearing* untuk mengukur kecepatan getaran yang terdeteksi pada *housing bearing* turbin. Sensor vibrasi jenis ini bekerja berdasarkan prinsip kerja induksi elektromagnetik sehingga dapat menghasilkan sinyal listrik yang berbanding lurus dengan kecepatan getaran yang terdeteksi. Sensor *velocity* merupakan salah satu jenis sensor proteksi untuk menjaga keamanan turbin terhadap getaran yang berebih. Pada gambar 2.11 menunjukkan prinsip kerja dari sensor *velocity*.



Gambar 2. 11 Prinsip Kerja Sensor *Velocity*

Prinsip kerja sensor *velocity* dapat dilihat pada wiring diagram di atas, sensor getaran jenis *velocity* bekerja dengan menerapkan prinsip kerja induksi elektromagnetik. Di mana pada wiring diagram di atas menunjukkan bahwasannya perubahan fluks magnet disebabkan oleh arus bolak-balik, sehingga dapat menghasilkan tegangan induksi pada kumparan yang lain. Apabila terdeteksi adanya getaran akibat mesin, maka pergerakan yang terjadi relatif antara magnet dengan kumparan sehingga menyebabkan perubahan fluks magnet yang menginduksi tegangan, di mana besar tegangan yang dihasilkan berbanding lurus dengan kecepatan getaran yang terjadi.

2.2.4 Faktor-faktor Penyebab Getaran Pada Turbin

2.2.4.1 Getaran Akibat Ketidakseimbangan

Peningkatan getaran pada rotor turbin salah satu faktor utamanya disebabkan oleh kondisi ketidakseimbangan massa (*unbalance*), faktor ketidakseimbangan massa ini terjadi dengan ditandai meningkatnya nilai amplitudo pada getaran. Ketidakseimbangan terjadi disebabkan akibat distribusi massa yang tidak merata pada rotor, sehingga menghasilkan gaya eksitasi yang memicu getaran. Kondisi ini dapat memicu permasalahan yang lebih parah akibat geseka rotor, stator, gangguan pada sistem pelumasan, serta perubahan pada sistem. Meskipun rotor telah melalui proses penyeimbangan sesuai prosedur pembuatannya, tidak memungkiri kondisi operasi di lapangan akan terjadi kesalahan seperti kesalahan pada instalasi, keausan pada material yang dapat menimbulkan faktor ketidakseimbangan. Apabila tidak dikendalikan permasalahan ketidakseimbangan tersebut, getaran yang meningkat dapat menyebabkan gangguan yang serius pada kerusakan komponen hingga mempengaruhi kinerja sistem pada turbin. [8]

2.2.4.2 Getaran Akibat Ketidaksejajaran Poros

Ketidaksejajaran (*misalignment*) adalah salah satu penyebab utama terjadinya getaran pada sistem rotor setelah faktor ketidakseimbangan seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya. Ketidaksejajaran dapat terjadi akibat ketidaktepatan posisi anatara poros,

kopling dan komponen lainnya yang dapat menimbulkan ketidaksejajaran yang menghasilkan gaya dan kondisi tambahan pada sistem. Kondisi ini yang secara langsung mempengaruhi karakteristik getaran dan peningkatan beban dinamis pada bantalan (*bearing*). Faktor ketidaksejajaran ini dapat disebabkan oleh kesalahan pada perawatan dan pemeliharaan yang tidak tepat, serta keausan yang terjadi pada material selama turbin beroperasi. Selain faktor tersebut, ketidaksejajaran poros juga dapat terjadi akibat perbedaan kondisi antara penyelarasan saat dingin dan kondisi operasi saat panas. Jika tidak diatasi permasalahan tersebut akan terjadi peningkatan getaran, kerusakan pada komponen hingga terjadi kondisi trip pada turbin. [8]

2.2.4.3 Getaran Akibat Kerusakan *Bearing*

Sistem kinerja *bearing* pada rotor ditentukan pada sistem pelumasan, di mana lapisan oli berfungsi sebagai pemisah antara poros turbin dan juga *bearing*. Ketidaksejajaran pada *bearing* akan menyebabkan posisi beban yang tidak merata ketika didistribusi, peningkatan suhu, serta terjadinya pelumasan yang dapat mengakibatkan keausan dan terjadinya peningkatan getaran pada turbin. Sistem pelumasan pada bantalan turbin sangat dibutuhkan karena menjadi penghalang antara pertemuan poros turbin dengan *bearing*. Apabila terjadi kesalahan dalam sistem pelumasan akan menimbulkan gesekan antara poros turbin dengan bantalan turbin sehingga mengakibatkan keausan pada material dan berdampak pada efisiensi kinerja turbin. [8]

2.2.4.4 Resonansi

Pada setiap sistem mekanik memiliki nilai frekuensi alami yang ditentukan oleh massa, kekakuan dan redaman. Pada mesin yang berputar, frekuensi alami berkaitan dengan kecepatan yaitu kondisi di mana frekuensi eksitasi mendekati frekuensi alami dari sistem. Ketika kondisi ini terjadi, fenomena resonansi akan muncul dengan ditandai adanya amplitudo getaran yang muncul secara signifikan. Resonansi dapat menyebabkan peningkatan tegangan secara mekanis, menimbulkan potensi kerusakan pada komponen seperti pada sudu-sudu turbin dan poros turbin. Pada faktor resonansi ini, redaman diperlukan untuk mengurangi amplitudo getaran dengan mengurangi energi, meskipun tidak secara cepat namun dapat mempengaruhi frekuensi alami dari sistem. [8]

2.2.4.5 Getaran Akibat Suhu

Turbin uap dengan kapasitas yang tinggi beroperasi dengan kondisi suhu dan tekanan yang tinggi sangat rentan timbulnya faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja dari turbin seperti kerusakan pada material serta suhu yang tinggi dapat memicu keretakan pada rotor. Perubahan kondisi operasi turbin pada saat *start up*, *shutdown* menyebabkan terjadinya tegangan termal. Termal yang shock akan mempercepat kerusakan pada material. Peningkatan suhu pada *bearing*, sistem pelumas, maupun gesekan yang terjadi akan memicu getaran yang tidak stabil. Kondisi ini akan berakibat lebih fatal karena turbin beroperasi dalam keadaan kritis. [8]

2.2.4.6 Getaran Akibat Buka-tutup Governor

Governor adalah komponen yang berfungsi untuk mengatur putaran turbin dengan cara mengatur buka-tutup katup sehingga jumlah uap yang masuk ke turbin disesuaikan dengan kebutuhan. Putaran turbin juga disesuaikan berdasarkan nilai setpoint yang sudah diatur yaitu 3000 rpm dan frekuensi yaitu $\pm 50\text{Hz}$. Semakin lebar buka-tutup yang dihasilkan, semakin banyak uap yang masuk sehingga meningkatkan putaran (RPM) dan daya keluaran turbin. [14]

2.2.4.7 Getaran Akibat Kerusakan Pada Turbin

Faktor kerusakan pada turbin adalah salah satu elemen yang sangat berpengaruh terhadap performa dari turbin. Salah satu faktor kerusakan turbin adalah terjadinya retakan akibat kegagalan yang terjadi pada sistem mekanis, khususnya pada poros turbin yang berputar. Retakan dapat timbul akibat tegangan yang tinggi (tidak dalam batas normal), korosi. Kondisi retakan ini dapat berkembang atau terjadi dengan cepat karena adanya tegangan dan kerenggangan pada ujung retakan. Retakan pada bilah sudu dapat menyebabkan ketidakseimbangan rotor sehingga memicu peningkatan getaran yang berlangsung secara mendadak dan bisa menyebabkan kerusakan pada bagian lainnya. [8]

Sehingga dapat diklasifikasikan bahwa getaran pada mesin yang berlebihan disebabkan oleh:

- Ketidakseimbangan (*unbalance*)

- Ketidaksejajaran (*misalignment*)
- Kekurangan pelumasan
- Adanya gaya dari luar
- Kerusakan pada komponen
- *Mechanical Looseness*
- *Electrical Problems*
- *Resonance*
- *Rubbing*
- *Aerodynamic & Hydraulic Forces*

Getaran yang berlebihan akan mengakibatkan:

- Gaya meningkat
- Tegangan meningkat
- Menimbulkan suara bising
- Mengendornya sambungan-sambungan

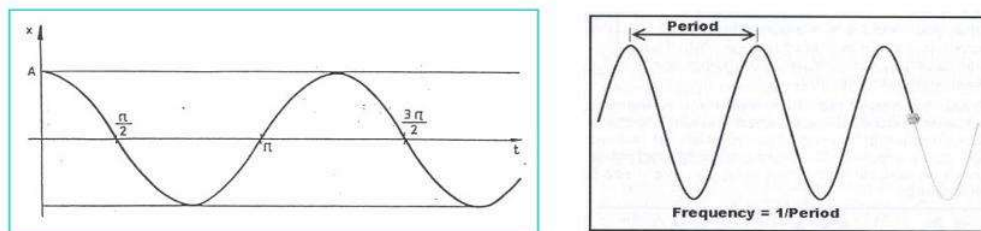
2.2.5 Parameter Getaran (Vibration)

2.2.5.1 Periode Waktu

Periode waktu adalah durasi yang diperlukan dalam satu siklus yang diukur dalam detik. Waktu getar T dinyatakan sebagai:

$$T = 2\pi / \omega. \quad (2.1)$$

Pada gambar 2.12 merupakan bentuk grafik *time periode*



Gambar 2. 12 Grafik *Time Periode*

2.2.5.2 *Frequency Linear*

- *Frekuensi linear* (f) merupakan jumlah siklus dalam setiap satuan waktu, jika waktu diukur dalam detik, maka satuannya adalah frekuensi Hertz (Hz).

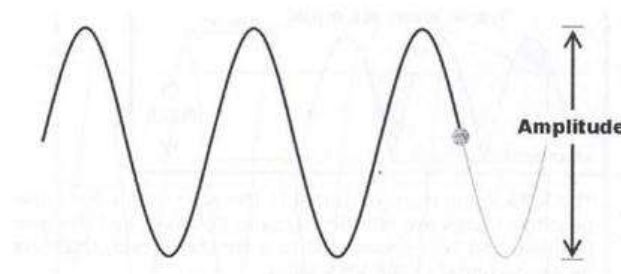
$$f = 1/T = \omega / 2\pi. \quad (2. 2)$$

- *Frequency sudut* (ω) yaitu $\omega = 2\pi f$
- Hubungan f dan ω sbb :

$$\omega = 2\pi f + \frac{2\pi}{T} \quad (2. 3)$$

2.2.5.3 **Amplitudo**

Amplitudo adalah simpangan terhadap titik awal. Pada gambar 2.13 menunjukkan bentuk amplitudo getaran.

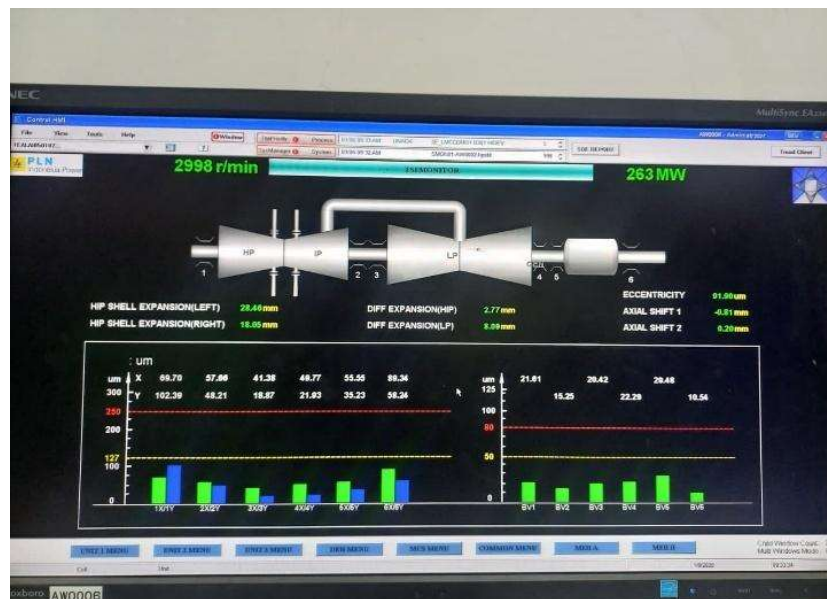


Gambar 2. 13 Amplitudo Getaran

2.2.6 **Analisis Tren Getaran**

Analisis tren getaran merupakan salah satu cara penting untuk memantau keadaan mesin yang berputar, terutama pada turbin uap. Metode analisis tren getaran ini dilakukan dengan cara mengamati perubahan nilai getaran terhadap waktu secara kontinu berdasarkan

rekapan data historis yang tersedia pada sistem *monitoring*. Tren getaran adalah suatu pola perubahan nilai getaran yang terjadi secara kontinu dalam periode waktu tertentu yang tersimpan atau terekam oleh sistem *monitoring*. Data tren ditampilkan dalam bentuk grafik untuk menunjukkan hubungan antara amplitudo getaran dan waktu. Dari grafik tersebut yang dapat menunjukkan kondisi setiap mesin apakah dalam keadaan stabil, terjadi peningkatan, atau mengalami fluktuasi yang tidak normal. Data tren inilah yang akan menjadi acuan dasar untuk mengidentifikasi faktor awal penyebab terjadinya gangguan. Pada gambar 2.14 merupakan salah satu contoh tampilan *monitoring* pada sistem kontrol di PLTU Banten 3 Lontar.



Gambar 2. 14 Contoh Tampilan *Monitoring* TSI

Secara menyeluruh, analisis tren getaran merupakan cara yang sangat ampuh dan berguna dalam membantu sistem untuk mendeteksi gangguan apa yang terjadi ketika vibrasi mencapai batas alarm atau terjadinya lonjakan vibrasi.

2.2.7 Condition Based Maintenance (CBM)

Pemeliharaan Berdasarkan Kondisi (CBM) merupakan strategi pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan kondisi aktual suatu mesin sehingga tindakan perawatan hanya dilakukan ketika parameter operasi menunjukkan gejala penurunan kinerja atau potensi

kerusakan. CBM memanfaatkan teknologi untuk pemantauan seperti menganalisis suhu, getaran untuk mendeteksi perubahan yang mengindikasikan adanya kondisi abnormal pada peralatan atau komponen. CBM bertujuan untuk mengurangi biaya pemeliharaan, meningkatkan keandalan dari suatu peralatan, memperpanjang umur pakai komponen, dan meminimalkan keadaan *downtime*. Dibandingkan dengan pemeliharaan reaktif (*breakdown maintenance*), CBM lebih unggul karena mampu memprediksi kerusakan yang terjadi melalui data *real-time* dan pengamatan tren parameter operasi. Sehingga CBM memberikan dasar bagi pengambilan keputusan pemeliharaan yang lebih akurat dan efisien. [15]

2.2.8 Predictive Maintenance

Predictive maintenance adalah jenis pemeliharaan yang dilakukan dengan terjadwal dan sudah direncanakan jangka pendek sehingga termasuk dalam kategori jenis pemeliharaan rutin namun memiliki jarak waktu yang lebih panjang dibandingkan dengan *preventive maintenance*. Misalnya, pada suatu peralatan hanya memerlukan satu kali *preventive maintenance* dalam kurun waktu 3 bulan atau 6 bulan sekali. Pemeliharaan prediktif di PLTU Banten 3 Lontar contohnya sebagai berikut :

a) Vibration

Kegiatan yang dilakukan dengan melakukan pemantauan dan analisis terhadap sifat-sifat getaran mesin untuk mencari tahu sumber penyebab getaran yang tidak normal sehingga menimbulkan kerusakan pada komponen. Jenis-jenis vibrasi yang menjadi analisa utama yaitu:

1. Perpindahan/ mengukur gap antara *probe* dengan objek (*displacement*) yang mengindikasikan seberapa besar objek bergetar.
2. Kcepatan (*velocity*) yang mengindikasikan seberapa cepat objek bergetar.
3. Percepatan (*accelerometer*) yang berkaitan dengan gaya atau gangguan yang menyebabkan terjadinya getaran.

2.2.9 Machine Learning

Machine Learning atau pembelajaran mesin adalah teknik pendekatan dari *Artificial Intelligence (AI)* yang digunakan untuk meniru untuk menggantikan peran manusia

dalam melakukan aktivitas untuk memecahkan sebuah masalah. *Machine Learning* adalah sebuah mesin yang dibuat untuk dapat belajar dan melakukan pekerjaan tanpa arahan dari penggunanya. Jenis-jenis Machine Learning terbagi menjadi tiga bagian yaitu *supervised learning*, *unsupervised learning*, dan *Reinforcement learning*. [16]

a) *Supervised Learning*

Algoritma *supervised learning* adalah jenis pembelajaran mesin yang paling umum dan paling banyak digunakan karena paling umum dan dirancang untuk belajar dengan contoh yang ada. *Supervised learning* memiliki kelebihan dan kekurangan, kelebihan dari *supervised learning* adalah algoritma *machine learning* yang prosesnya sederhana dan mudah dipahami. Kekurangan dari *supervised learning* membutuhkan waktu yang cukup lama untuk melatih dan menggunakan algoritma yang lebih kompleks dari pada algoritma *unsupervised learning* karena membutuhkan labeling pada data yang akan digunakan. [16]

b) *Unsupervised Learning*

Unsupervised learning adalah algoritma yang tidak memerlukan data yang berlabel. Algoritma ini digunakan dalam pendeteksian pola dan pemodelan deskriptif yang tidak memerlukan kategori atau keluaran berlabel untuk membentuk dasar algoritma untuk menemukan model yang tepat. Algoritma ini digunakan untuk *clustering* dan aturan asosiasi. Keuntungan menggunakan *unsupervised learning* adalah tidak memerlukan label pada data yang akan digunakan, algoritma ini lebih fleksibel untuk mencari pola yang mungkin belum diketahui sebelumnya. Sedangkan kekurangan dari algoritma ini adalah sulitnya dalam mencari informasi di dalam data karena tidak ada label dan lebih sulit membandingkan output dengan input. [16]

c) *Reinforcement Learning*

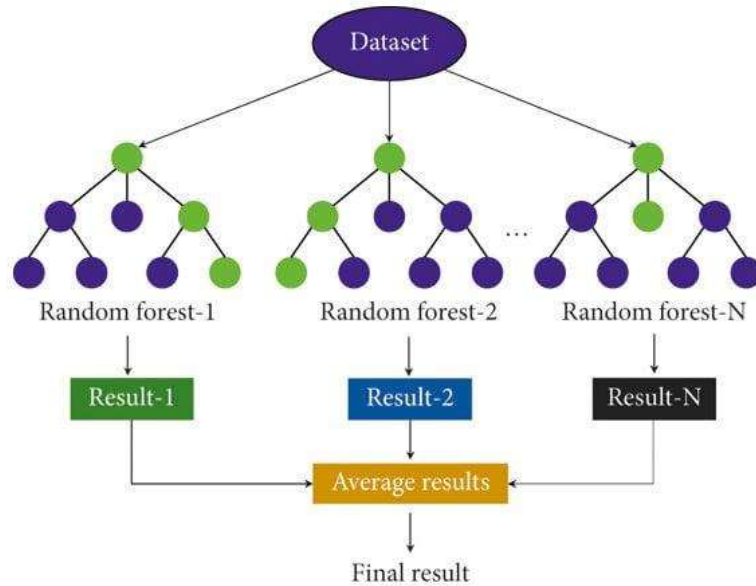
Reinforcement learning adalah algoritma yang tidak dapat dimasukkan ke dalam pembelajaran *supervised* atau *unsupervised learning*. Algoritma ini cocok digunakan untuk sejumlah data besar yang dibagi menjadi dua bagian yang berlabel dan tidak berlabel. Tujuan dari *reinforcement learning* adalah menggunakan penguatan yang

dikumpulkan dari interaksi dengan lingkungan untuk mengambil tindakan yang akan memaksimalkan hasil dan meminimalkan risiko. [16]

2.2.10 *Random Forest*

Random Forest adalah algoritma pengembangan dari algoritma *Decision Tree* yang memiliki kelebihan yaitu, dapat meningkatkan hasil akurasi, efisiensi untuk penyimpanan sebuah data serta mempunyai proses seleksi fitur dimana mampu mengambil fitur terbaik sehingga dapat meningkatkan performa terhadap model klasifikasi. Dengan adanya seleksi fitur tertentu *random forest* dapat bekerja pada data yang jumlahnya besar dengan parameter yang kompleks secara efektif.

Random Forest adalah algoritma yang terdiri dari beberapa *predictor tree* atau biasa disebut dengan *decision tree*. Setiap *tree* dalam *random forest* tersebut bergantung pada nilai *random vector* yang diambil secara acak dan merata pada semua *tree*. Hasil prediksi dari *random forest* didapatkan melalui hasil terbanyak dari setiap individual *decision tree*, yaitu dengan menggunakan voting untuk klasifikasi dan rata-rata untuk regresi. Jadi *random forest* adalah algoritma yang menggabungkan hasil prediksi dari banyak *decision tree* untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat. [17] Pada gambar 2.15 merupakan bagan alir algoritma *random forest*.



Gambar 2. 15 Flowchart Algoritma *Random Forest*

2.2.11 *Confusion Matrix*

Confusion matrix merupakan metode yang digunakan sebagai pengukur kinerja setelah mengolah data *mining* dengan model klasifikasi. Pada dasarnya, pengukuran dengan *confusion matrix* untuk memberikan perbandingan dari hasil klasifikasi yang dilakukan oleh suatu algoritma yang digunakan dengan hasil klasifikasi yang sebenarnya. *Confusion matrix* memiliki pembagian antara *predicted* dan *actual* yaitu, *True Positive* (TP), *False Positive* (FP), *False Negative* (FN), dan *True Negative* (TN). Penjelasannya adalah sebagai berikut: [18]

- a) *True Positive* (TP): Merupakan data positif yang diprediksi benar.
- b) *True Negative* (TN): Merupakan data negative yang diprediksi benar
- c) *False Positive* (FP): Merupakan data yang diprediksi error, data negatif namun diprediksi sebagai data positif.
- d) *False Negative* (FN): Merupakan data yang diprediksi error, data positif namun diprediksi sebagai data negatif.

Confusion matrix merupakan metode yang lebih efektif dalam mengevaluasi kinerja dari klasifikasi, yaitu menggunakan *confusion matrix*. *Confusion matrix* merupakan bentuk tabel yang digunakan untuk menampilkan jumlah data yang diuji kemudian diklasifikasikan dengan dua pilihan yaitu benar dan salah, sehingga memudahkan dalam mengevaluasi akurasi suatu sistem klasifikasi. Dengan menggunakan *confusion matrix* dapat secara detail melihat suatu sistem klasifikasi yang dapat mengidentifikasi di mana terjadi kesalahan ketika klasifikasi. *Confusion matrix* digunakan untuk melakukan perhitungan dalam menunjukkan seberapa baik evaluasi klasifikasi dengan dilihat dari nilai akurasi, presisi, *recall*, dan *F1-score*. [19] Adapun rumus perhitungan dari *Confusion matrix* sebagai berikut:

Akurasi:

Nilai akurasi, menunjukkan seberapa akurat model dalam mengklasifikasikan dengan tepat.

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (2.4)$$

Presisi:

Nilai presisi menunjukkan nilai akurasi antara data yang diminta dengan hasil prediksi yang diberikan oleh sebuah model.

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2.5)$$

Recall:

Recall atau *sensitivity* menunjukkan keberhasilan suatu model dalam menemukan informasi.

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2.6)$$

F1-Score:

F1-Score merupakan perbandingan rata-rata dari nilai presisi dan nilai *recall*.

$$F1-Score = 2 * \frac{(Precision * Recall)}{(Precision + Recall)} \quad (2.7)$$

2.2.12 *Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE)*

Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE) merupakan salah satu teknik *oversampling* yang digunakan sebagai penambahan data yang minoritas pada suatu dataset yang tidak seimbang. SMOTE memiliki sistem kerja untuk dapat menghasilkan sampel sintesis yang baru pada suatu data minoritas. Data sintesis bekerja dengan menerapkan atau berdasarkan sistem kerja K-Nearest Neighbor. SMOTE bekerja dengan dimulai dengan identifikasi data minoritas dan menentukan k tetangga yang terdekat dengan persamaan jarak seperti yang dapat dilihat pada persamaan 2.8 berikut: [20]

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2.8)$$

Keterangan:

$D(x, y)$ = Jarak *Euclidean*

X_i dan y_i = Koordinat x dan y pada dimensi ke-i

n = Jumlah dimensi *Euclidean*

Selanjutnya, dilakukan penyeimbangan data dengan menggunakan metode SMOTE untuk menghasilkan sampel sintesis kelas minoritas. Proses ini dimulai dengan memilih sampel minoritas secara acak, kemudian menghitung perbedaan fitur dengan tetangga terdekatnya. Perbedaan tersebut kemudian dikalikan dengan angka acak dan ditambahkan ke nilai sampel yang asli untuk membentuk data yang baru. Seluruh sampel sintesis yang terbentuk kemudian digabungkan ke dalam dataset, sehingga distribusi data minoritas lebih seimbang.