

ANALISA SPEKTRUM VIBRASI PADA CONDENSATE EXTRACTION PUMP DI PLTU JAWA 9 DAN 10 MENGGUNAKAN METODE FAST FOURIER TRANSFORM

Moh. Syukron Makmun S^{1*}, Ilyas Sofana², Moh. Arif Batutah³, Ponidi⁴

¹Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Muhammadiyah University of Surabaya
Jl. Sutorejo No. 59, Surabaya, Indonesia

*email : syukron.mechanical.technician@gmail.com

(Received: 25-07-2026; Reviewed: 10-08-2026; Accepted: 15-08-2026)

Abstrak

Vibrasi berlebih pada pompa industri merupakan indikator kegagalan mekanis yang berisiko merusak instrumentasi dan struktur pompa. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik getaran serta mengidentifikasi penyebab tingginya amplitudo vibrasi pada Condensate Extraction Pump (CEP) di PLTU Jawa 9 dan 10. Metodologi penelitian melibatkan pengumpulan data vibrasi overall dan spektrum frekuensi menggunakan vibration monitoring system pada rentang operasional 1100 rpm hingga 1450 rpm. Analisis data dilakukan dengan metode Fast Fourier Transform (FFT) untuk membedah domain frekuensi dominan. Hasil analisis spektrum menunjukkan dominasi frekuensi pada 1X rpm, dengan level vibrasi tertinggi tercatat pada rentang 1100 rpm hingga 1200 rpm. Vibrasi mengalami penurunan signifikan secara asimtotik saat putaran mesin melewati 1300 rpm hingga mencapai beban penuh di sekitar 1450 rpm. Temuan ini mengidentifikasi adanya fenomena resonansi akibat pertemuan frekuensi putaran mesin dengan frekuensi natural sistem. Sebagai langkah mitigasi, penelitian ini merekomendasikan modifikasi struktur melalui penambahan stiffener untuk menggeser frekuensi natural serta pembatasan rentang operasional di bawah 1300 rpm. Evaluasi ini menegaskan krusialnya pemetaan frekuensi kritis untuk menjaga integritas struktural dan umur pakai pompa industri.

Kata kunci: condensate extraction pump, analisa vibrasi, fast fourier transform, frekuensi natural, resonansi.

1. PENDAHULUAN

Condensate Extraction Pump (CEP) merupakan komponen vital dalam siklus pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang berfungsi memompakan kembali air kondensasi dari kondensor menuju feedwater heater dalam sistem sirkulasi tertutup (close loop). Selain itu, pompa ini berperan penting dalam menjaga tekanan vakum kondensor secara terintegrasi dengan condenser vacuum pump (Sularso, 2000).

Secara struktural, desain vertikal CEP yang menjulang tanpa penopang atas menyebabkan kekakuan mesin menjadi rendah dan rentan terhadap fenomena resonansi. Penggunaan Variable Frequency Drive (VFD) untuk efisiensi energi saat ini justru meningkatkan potensi masalah tersebut karena adanya persinggungan antara kecepatan putar dengan frekuensi pribadi struktur (Vogel, 2017).

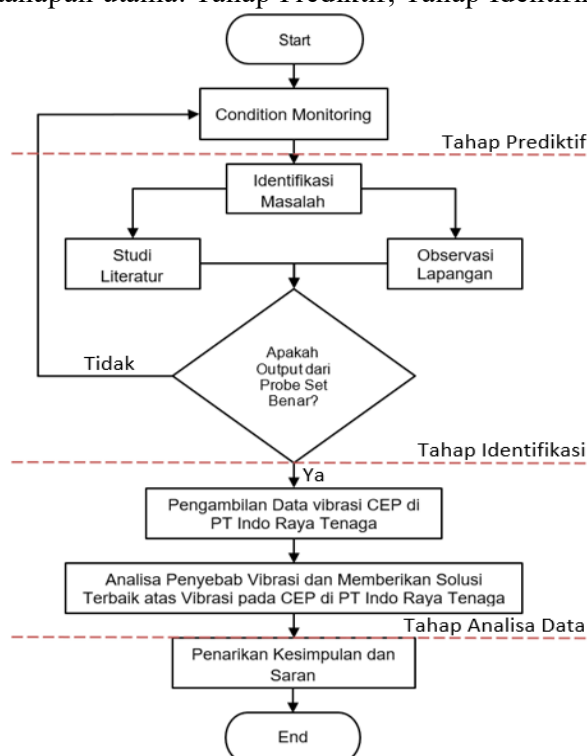
Pada operasional PLTU Jawa 9 dan 10 milik PT Indo Raya Tenaga, ditemukan 4 dari 6 unit CEP mengalami vibrasi tinggi yang melampaui standar keamanan ISO. Jika dibiarkan, kondisi ini

akan berdampak pada kerusakan instrumen sensor hingga kegagalan fatal (catastrophic failure) yang memicu penghentian paksa (trip) pada unit pembangkit (ISO 10816-3, 2009).

Penelitian ini difokuskan pada analisis spektrum vibrasi menggunakan metode Fast Fourier Transform (FFT) untuk mendiagnosa sumber utama kegagalan pada CEP. Melalui analisa ini, diharapkan diperoleh solusi teknis yang dapat membantu PT Indo Raya Tenaga dalam menjaga keandalan mesin serta menjadi referensi bagi praktisi condition monitoring di Indonesia (Rao, 2018).

2. METODOLOGI

Metodologi penelitian ini disusun secara sistematis untuk mengidentifikasi serta menganalisis akar permasalahan vibrasi pada Condensate Extraction Pump (CEP). Alur penelitian dibagi menjadi tiga tahapan utama: Tahap Prediktif, Tahap Identifikasi, dan Tahap Analisa Data.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.1 Tahap Prediktif

Penelitian diawali dengan proses Condition Monitoring untuk memantau status kesehatan mesin secara real-time. Pada tahap ini, dilakukan identifikasi masalah awal terhadap unit CEP yang menunjukkan indikasi deviasi getaran. Proses ini didukung dengan studi literatur mengenai dinamika rotasi dan observasi langsung di lapangan untuk memahami karakteristik teknis serta lingkungan operasional pompa di PLTU Jawa 9 dan 10.

2.2 Tahap Identifikasi

Setelah masalah terdefinisi, dilakukan validasi terhadap instrumen pengukuran melalui pemeriksaan output dari probe set. Jika data yang dihasilkan oleh sensor tidak valid atau tidak konsisten, maka proses akan kembali ke tahap condition monitoring untuk kalibrasi ulang. Apabila data dinyatakan valid, penelitian dilanjutkan ke tahap pengambilan data vibrasi CEP di lokasi PT Indo Raya Tenaga secara komprehensif.

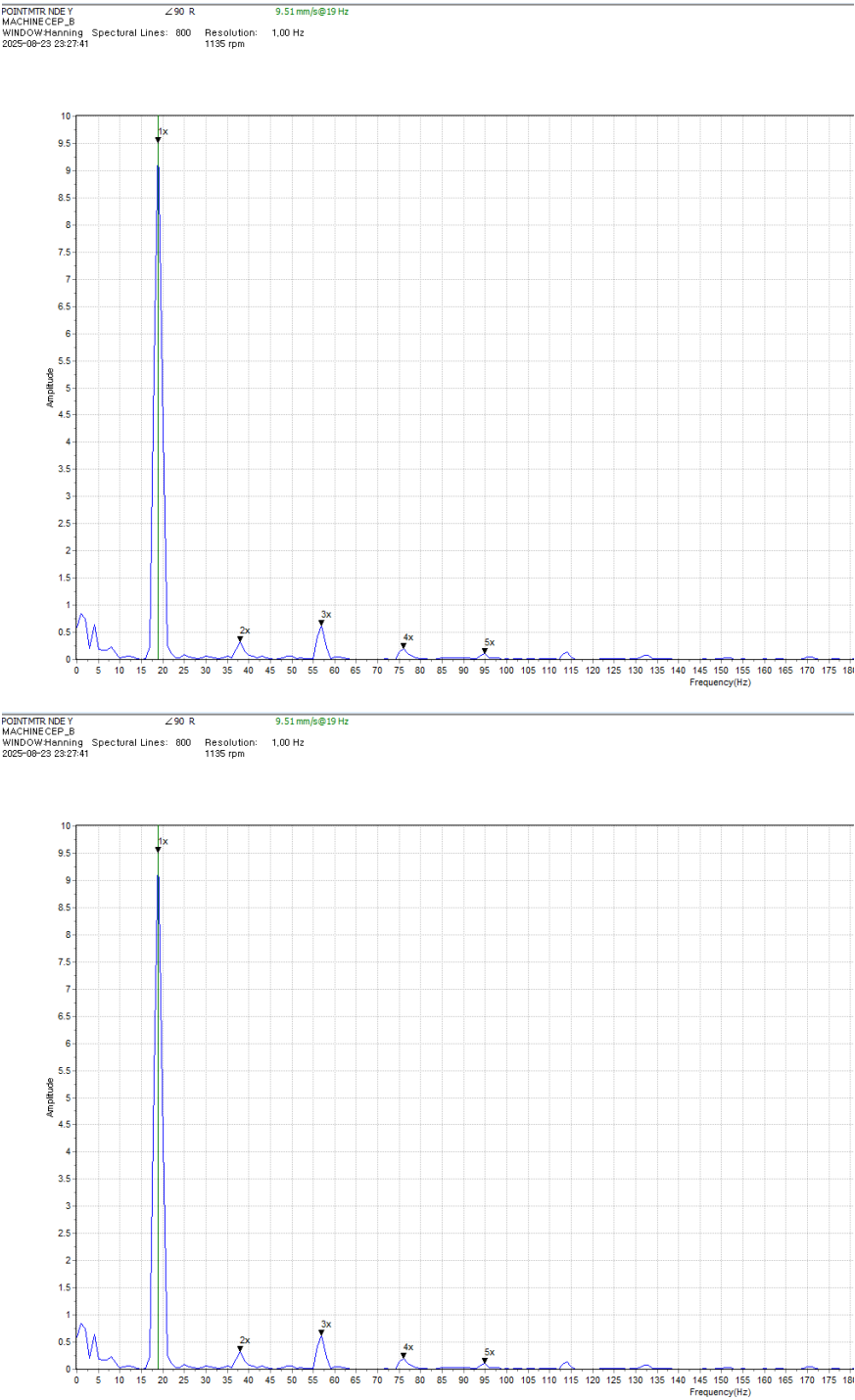
2.3 Tahap Analisa Data

Tahap terakhir melibatkan pengolahan data vibrasi yang telah dikumpulkan untuk menganalisis penyebab utama tingginya amplitudo getaran. Pada fase ini, dilakukan pembedahan spektrum frekuensi guna menentukan apakah masalah bersumber dari resonansi atau gangguan mekanis lainnya, yang kemudian diikuti dengan perumusan solusi teknis terbaik untuk mitigasi masalah. Seluruh rangkaian penelitian ditutup dengan penarikan kesimpulan yang relevan serta pemberian saran teknis untuk pemeliharaan di masa mendatang.

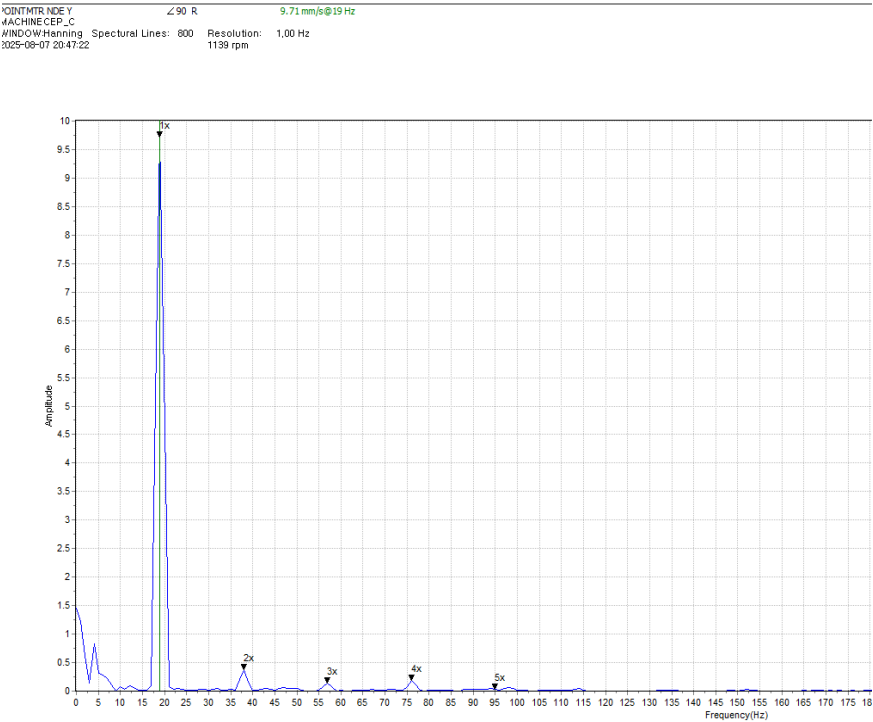
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data spektrum frekuensi CEP

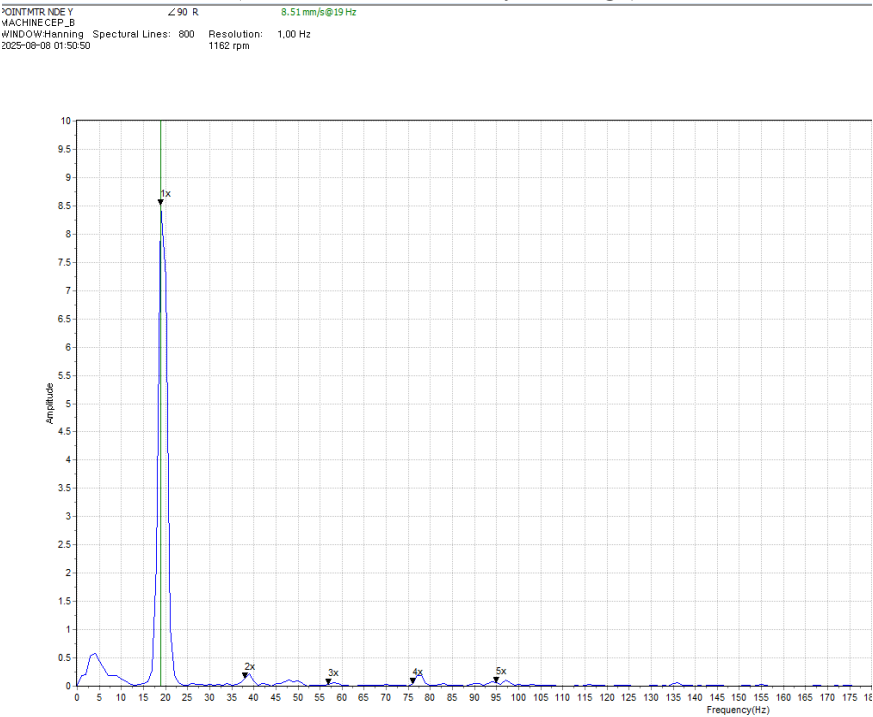
Data spektrum yang didapatkan dari VMS menunjukkan bahwa CEP memiliki nilai amplitudo vibrasi tinggi yang dominan pada 1X putaran mesin. Pada gambar 2 di bawah, dapat dilihat vibrasi dominan 1X pada CEP 1B memiliki amplitudo mencapai 9.5 mm/s rms pada putaran mesin 1135 rpm. Sedangkan pada CEP 1C yang ditunjukkan oleh gambar 3, amplitudo vibrasi dominan di 1X putaran mesinnya mencapai 9,71 mm/srms pada putaran mesin 1139 rpm. Begitu pula pada gambar 4 dan gambar 5, terlihat vibrasi dominan 1X pada CEP 2B memiliki amplitudo mencapai 8.5 mm/s rms pada putaran mesin 1162 rpm dan vibrasi dominan 1X pada CEP 2C memiliki amplitudo mencapai 5.9 mm/s rms pada putaran mesin 1159 rpm. Dari data VMS, terlihat bahwa kecepatan putaran mesin CEP pada saat terjadi vibrasi tersebut semuanya berkisar diantara 1.100 – 1.200 rpm. Frekuensi 1X putaran mesin sangat dominan pada semua titik pengukuran motor. Namun amplitudo tertinggi semuanya berada pada titik motor NDE-Y.



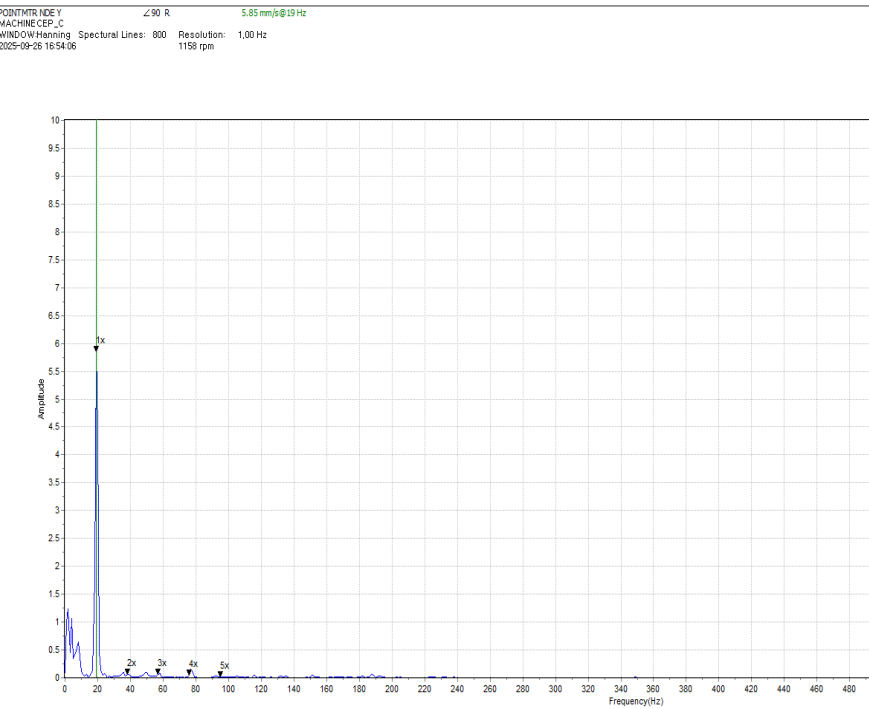
Gambar 2. Spektrum Vibrasi CEP 1B Motor NDE-Y
(Sumber : PT Indo Raya Tenaga)



Gambar 3. Spektrum Vibrasi CEP 1C Motor NDE-Y
(Sumber : PT Indo Raya Tenaga)

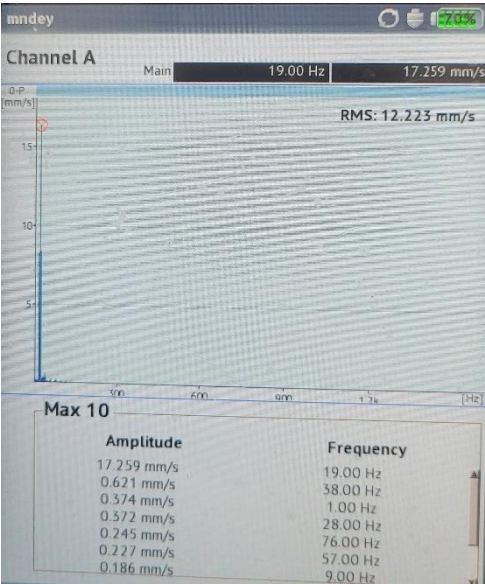


Gambar 4. Spektrum Vibrasi CEP 2B Motor NDE-Y
(Sumber : PT Indo Raya Tenaga)

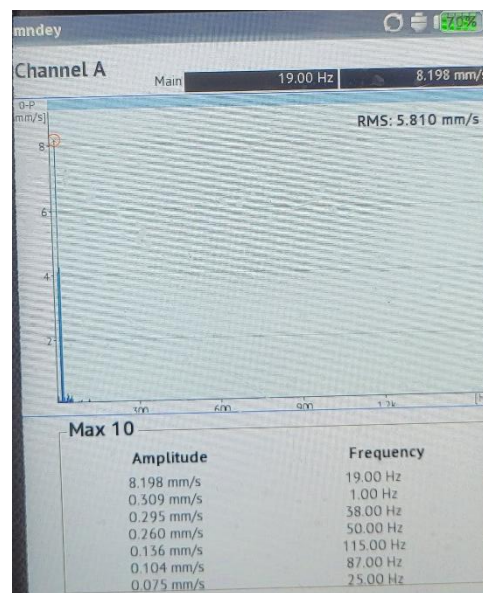


Gambar 5. Spektrum Vibrasi CEP 2C Motor NDE-Y
(Sumber : PT Indo Raya Tenaga)

Hal yang sama juga ditunjukkan oleh gambar data spectrum di bawah yang didapatkan dari portable data analyzer. Pada gambar tersebut terlihat bahwa amplitude tertinggi sebesar 12,2 mm/s rms terdapat pada 19 Hz atau sama saja dengan 1X putaran mesin. Nilai order 1X ini didapatkan dari kecepatan putaran mesin saat pengambilan data yaitu sebesar 1140 rpm dibagi dengan 60. Semua spectrum dominan pada 1X putaran motor. Dan juga amplitude tertingginya terdapat pada sisi motor NDE-Y.



Gambar 6. Spektrum Vibrasi pada CEP 1B Motor NDE-Y Menggunakan Portable Data Analyzer
(Sumber : PT Indo Raya Tenaga)



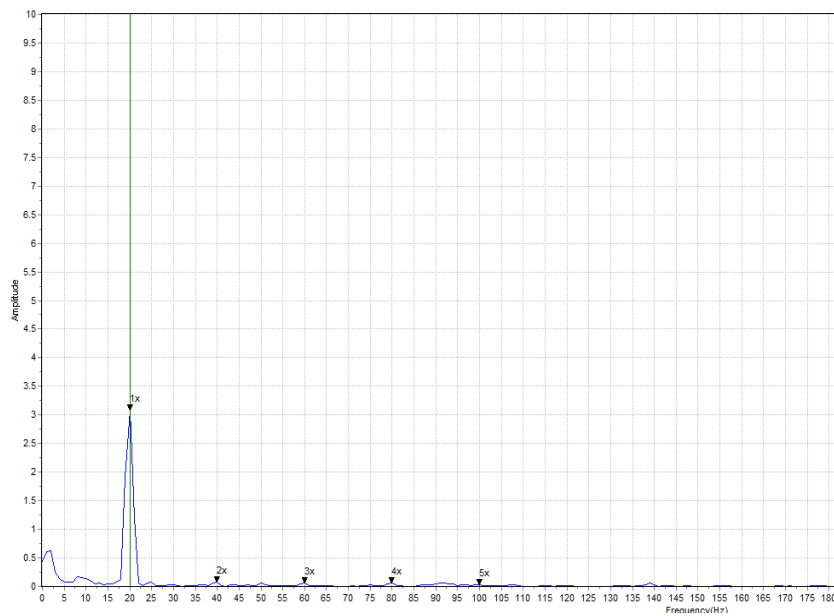
Gambar 7. Spektrum Vibrasi pada CEP 2C Motor NDE-Y Menggunakan Portable Data Analyzer
(Sumber : PT Indo Raya Tenaga).

3.2 Analisa kerusakan

Sebelum memulai analisa kerusakan yang terjadi pada CEP 1B, CEP 1C, CEP 2B dan CEP 2C, ada baiknya perlu diketahui bagaimana karakteristik spektrum frekuensi vibrasi pada Condensate Extraction Pump yang tidak mengalami permasalahan yaitu CEP 1A dan CEP 2A sebagai pembanding. Data overall vibrasi yang didapatkan dari VMS menunjukkan tidak terdapat vibrasi yang mencapai zona C dari CEP 1A dan CEP 2A, baik di sisi motor NDE, motor DE maupun pompa DE. Sedangkan data spectrum keduanya yang didapatkan dari VMS, memiliki karakteristik yang sama dengan ke empat pompa CEP yang mengalami vibrasi yaitu dominan di 1X putaran mesin. Perbedaannya hanya pada amplitude spektrumnya yang jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan CEP yang mengalami vibrasi.

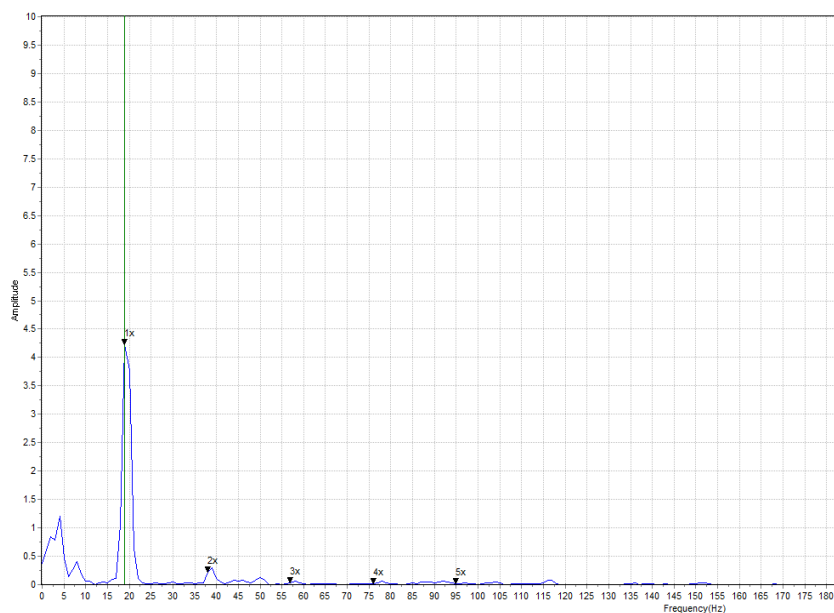
Data overall vibrasi yang didapatkan dari portable data analyzer pun menunjukkan CEP 1A dan CEP 2A dalam keadaan normal. Sedangkan CEP lainnya mengalami vibrasi sama seperti data yang didapatkan dari VMS. Hal serupa juga terjadi pada data spectrum yang didapatkan dari portable data analyzer. Keempat pompa CEP yang mengalami vibrasi yaitu dominan di 1X putaran mesin. Vibrasi dengan karakteristik dominan 1X putaran mesin mengindikasikan beberapa gangguan seperti unbalance, resonansi, rotor bow, dan structural looseness.

POINTMTR NDE-Y
MACHINE CEP_A
WINDOW: Hanning Spectral Lines: 800 Resolution: 1.00 Hz
2025-08-08 07:55:12 1192 rpm



Gambar 8. Spectrum Vibrasi CEP 1A Motor NDE-Y
(Sumber : PT Indo Raya Tenaga)

POINTMTR NDE-Y
MACHINE CEP_A
WINDOW: Hanning Spectral Lines: 800 Resolution: 1.00 Hz
2025-08-07 23:58:02 1164 rpm



Gambar 9. Spektrum Vibrasi CEP 2A Motor NDE-Y
(Sumber : PT Indo Raya Tenaga)

Berdasarkan gambar 8, spektrum CEP 1A dominan di 1X dengan amplitude sebesar 3,0 mm/s rms pada speed 1192 rpm. Sedangkan CEP 2A memiliki spektrum dominan di 1X dengan nilai amplitude sebesar 4,2 mm/s rms pada kecepatan putar 1164 rpm. Dengan parameter yang hampir sama yaitu putaran mesin di antara 1100 rpm hingga 1200 rpm, keduanya memiliki spektrum sama

di 1X namun dengan nilai amplitude yang masih masuk ke dalam zona B menurut ISO 10816-7 kategori I dengan daya motor lebih dari 200 KW.

Dari semua data spektrum yang ada, tidak ditemukan frekuensi-frekuensi lain yang meningkat nilai amplitudanya yang mana bila terjadi peningkatan pada frekuensi lain tersebut maka secara signifikan akan mempengaruhi performa dan keandalan condensate extraction pump. Seperti frekuensi bearing motor, frekuensi bearing pompa, frekuensi bilah pompa, dan frekuensi bilah kipas motor. Oleh karenanya, kegagalan mesin selain daripada yang disebabkan 1X putaran mesin dapat dieeliminasi.

3.3 Hasil Analisa

Berdasarkan semua data yang telah didapatkan, karakteristik spektrum frekuensi yang baik dalam pengoperasian condensate extraction pump (CEP) yaitu dominan hanya di 1X putaran mesin dengan nilai amplitude yang rendah. Serta tidak ada peningkatan vibrasi di frekuensi – frekuensi penting lainnya seperti frekuensi 6X yang menunjukkan adanya permasalahan pada bilah CEP, terbentuknya noise floor di bawah frekuensi 6X hingga ke frekuensi tinggi yang menandakan adanya kavitasi, frekuensi harmonis 1X, 2X, 3X, 4X, 5X, 6X dan seterusnya yang jika semuanya naik menandakan adanya permasalahan bearing atau structural looseness ataupun misalignment yang parah.

Dari data CEP yang memiliki nilai vibrasi tinggi, didapatkan spektrum dominan hanya pada 1X putaran mesin dengan nilai amplitude yang tinggi tanpa ada peningkatan amplitude pada frekuensi lainnya. Oleh karenanya, analisa dapat terfokuskan pada permasalahan kegagalan mesin yang memiliki ciri dominan hanya 1X putaran mesin. Dari analisa data yang ada, permasalahan kegagalan mesin dominan 1X putaran mesin berupa unbalance, rotor bow, structural looseness dapat tereliminasi. Hal ini dikarenakan condensate extraction pump dapat beroperasi dengan normal saat berada di beban dan kecepatan tinggi. Sedangkan jika terjadi kegagalan unbalance, rotor bow, ataupun structural looseness, vibrasi akan tetap tinggi walaupun putaran mesin berubah lebih cepat.

Permasalahan yang paling memungkinkan terjadi pada CEP 1B, CEP 1C, CEP 2B dan CEP 2C di PT Indo Raya Tenaga yaitu resonansi yang disebabkan saat putaran mesin pada rentang kecepatan putar 1100 rpm hingga 1200 rpm memasuki zona natural frequency CEP itu sendiri. Pada CEP 1A dan CEP 2A tidak terjadi vibrasi saat berada di rentang kecepatan putar tersebut dikarenakan natural frequency keduanya tidak berkisar di rentang tersebut. Hal ini dapat terjadi dikarenakan perbedaan panjang desain perpipaan pada suction CEP 1A dan CEP 2A yang lebih pendek dari pada CEP lainnya. Berdasarkan Mobius (VCAT-II, 2014) dinyatakan bahwa "Pipa, pondasi, dan mesin berputar di setiap pabrik memiliki frekuensi alami". Oleh karena itu, jika sebuah mesin dipasang pada sesuatu yang memiliki frekuensi alami yang sama dengan kecepatan motor, tingkat getarannya akan meningkat secara signifikan dan akan terjadi resonansi. Semua CEP seharusnya memiliki frekuensi alami yang tidak bervariasi secara signifikan dalam kondisi bebas-bebas. Frekuensi alami ini berubah seiring dengan pemasangan motor dan sistem. Dari susunan pipa suction CEP, dapat terlihat bahwa panjang pipanya bervariasi. Perbedaan ini tentu saja menyebabkan perbedaan frekuensi alaminya.



Gambar 10. Arrangement Perpipaian Suction CEP
(Sumber : PT Indo Raya Tenaga)

Berdasarkan **Gambar 8** dan **Gambar 9** dapat disimpulkan bahwa itulah gambaran keadaan ideal pengoperasian CEP di PT Indo Raya Tenaga saat beroperasi. Yaitu semua CEP dapat beroperasi di rentang putaran mesin 1100 rpm hingga kecepatan putar maksimal di 1485 rpm, dengan spektrum dominan di 1X putaran mesin dengan nilai amplitude vibrasi di bawah 5,0 mm/srms ataupun masuk ke zona B menurut ISO 10816-7 kategori I dengan daya motor lebih dari 200 KW.

3.4 Strategi Mitigasi

Ada beberapa cara yang dapat digunakan sebagai strategi mitigasi untuk mengatasi permasalahan resonansi yang terjadi pada condensate extraction pump (CEP) di PT Indo Raya Tenaga. Strategi pertama dan yang paling mudah yaitu mengoperasikan CEP pada kecepatan putaran mesin di luar rentang 1100 rpm hingga 1200 rpm. Jadi, bisa dioperasikan pada kecepatan putar 1200 rpm hingga kecepatan putar maksimumnya di 1485 rpm atau pada kecepatan putar di bawah 1100 rpm. Walaupun hal ini bisa saja untuk dilakukan, namun langkah ini sangat memberatkan dari berbagai aspek untuk dilakukan. Yang pertama, kecepatan putar CEP mengikuti perubahan beban. Jika CEP harus dioperasikan pada kecepatan putar di atas 1200 rpm secara kontinu, maka beban harus tinggi terus - menerus. Hal ini tidak memungkinkan dikarenakan beban akan terus berubah mengikuti permintaan dari PLN. Begitu pula sebaliknya jika CEP dioperasikan di bawah 1100 rpm. Yang kedua, bisa saja CEP dioperasikan dengan kecepatan putar konstan di speed yang diinginkan dengan melepas VFD seperti pada desain PLTU lama dengan hanya mengandalkan control valve sebagai pengatur flow. Namun bagi manajemen tentu saja ini merugikan dimana pada desain modern, dengan menggunakan VFD di CEP dapat meningkatkan efisiensi, terlebih dengan membuang 6 buah VFD yang telah dibeli. Serta merubah desain ini tentu saja membutuhkan waktu yang lebih lama sehingga memerlukan biaya tambahan yang cukup besar.

Strategi mitigasi yang kedua yaitu dengan memindahkan frekuensi alami CEP. Memindahkan frekuensi alami dapat dilakukan dengan menurunkannya di frekuensi yang lebih rendah atau menaikannya pada frekuensi yang lebih tinggi. Menurut (Erbessd, 2020) ada tiga cara untuk memodifikasi natural frequency diantaranya yaitu:

- a. Meningkatkan natural frequency dengan meningkatkan kekakuan daripada struktur.

- b. Menurunkan natural frequency dengan cara menghilangkan kekakuan pada struktur. Hal ini tidak umum, tetapi sama-sama memungkinkan dan efektif, asalkan kinerja mesin tidak terganggu.
- c. Menurunkan natural frequency dengan menambahkan massa.
- d. Meningkatkan natural frequency dengan mengurangi massa.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian dan hasil analisa vibrasi pada Condensate Extraction Pump (CEP) di PT Indo Raya Tenaga, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- a. Karakteristik spektrum frekuensi yang aman dalam pengoperasian Condensate Extraction Pump (CEP) yaitu dominan hanya di 1X putaran mesin dengan nilai amplitude yang rendah.
- b. Selain frekuensi 1X putaran mesin, terdapat frekuensi – frekuensi lain yang paling signifikan mempengaruhi performa dan keandalan CEP bila terjadi peningkatan amplitude pada frekuensi tersebut. Seperti frekuensi 6X yang menunjukkan adanya permasalahan pada bilah CEP bearing motor, terbentuknya noise floor di bawah frekuensi 6X hingga ke frekuensi tinggi yang menandakan adanya kavitasi, frekuensi harmonis 1X, 2X, 3X, 4X, 5X, 6X dan seterusnya yang jika semuanya naik menandakan adanya permasalahan bearing atau structural looseness ataupun misalignment yang parah.
- c. Parameter operasi berupa beban dan putaran mesin berpengaruh pada CEP 1B, 1C, 2B, dan 2D. Namun beban tidak mempengaruhi secara langsung perubahan spektrum vibrasi pada CEP. Beban mempengaruhi melalui hubungan yang berbanding lurus dengan kecepatan putar CEP. Dikarenakan saat beban di PLTU 9 & 10 berubah, maka kecepatan putar CEP akan berubah mengikuti beban. Saat beban meningkat, kecepatan putar CEP juga ikut meningkat dan spektrum vibrasi memiliki nilai amplitude yang kecil di 1X putaran mesin. Sebaliknya saat beban menurun, kecepatan putar CEP juga ikut menurun dan spektrum vibrasi memiliki nilai amplitude yang besar di 1X putaran mesin.
- d. Strategi mitigasi yang dapat dilakukan untuk mengurangi dampak vibrasi pada CEP yaitu mengoperasikan pompa CEP pada kecepatan putaran mesin di luar rentang 1100 rpm hingga 1200 rpm. Atau bisa dikatakan mengoperasikan CEP pada kecepatan putar 1200 rpm hingga kecepatan putar maksimumnya di 1485 rpm atau pada kecepatan putar di bawah 1100 rpm. Strategi mitigasi yang kedua dapat dilakukan dengan cara memindahkan frekuensi alami CEP menjadi lebih tinggi ataupun lebih rendah.
- e. Keadaan ideal CEP di PT Indo Raya Tenaga saat beroperasi yaitu semua CEP dapat beroperasi di rentang putaran mesin 1100 rpm hingga kecepatan putar maksimal di 1485 rpm, dengan spektrum dominan di 1X putaran mesin dengan nilai amplitude vibrasi di bawah 5,0 mm/s rms ataupun di bawah zona C menurut ISO 10816-7 kategori I dengan daya motor lebih dari 200 KW.

DAFTAR PUSTAKA

- Mobius Institute. 2012. Vibration Training Course Book Category II.
- Mobius Institute. 2015. Vibration Training Course Book Category III.
- Salman, Wael. 2025. Machinery Vibration Analysis. VibSolution.
- Bhimadi, Tungga. 2011. Dasar – Dasar Getaran Mekanis. Yogyakarta: ANDI Offset.
- Serridge, Mark., Licht, Torben R. 1987. Piezoelectric Accelerometer and Vibration Preamplifier Handbook. Denmark: Bruel and Kjaer.

- Mais, Jason. 2002. Spectrum Analysis. USA: SKF USA Inc.
- McMillan, Robert, B. 2004. Rotating Machinery: Practical Solutions to Unbalance and Misalignment. Georgia: Fairmont Press Inc.
- Bently, Donald, E. 2002. Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostic. Canada: Bently Pressurized Bearing Company.
- Taylor, James, L. 1994. The Vibration Analysis Handbook. Vibration Consultant Inc.
- BSI, 2009. Mechanical Vibration – Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts. Part 7: Rotodynamic Pumps for Industrial Applications, Including Measurement on Rotating Shaft. London: British Standard Institutions.
- ISO 20816-3, 2022. Mechanical Vibration – Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts. Part 3: Industrial Machinery with Power Rating Above 15 kW and Operating Speeds Between 120 r/min and 30 000 r/min. Geneva: ISO
- Ludeca. Vibration Analysis Know-How: Understanding Resonance. <URL: <https://www.youtube.com/watch?v=jpriatSJLZM> >.
- Vogel, Eugene. 2017. Limiting Vibration Issues in Vertical Turbine Pumps, <URL: <https://www.pumpsandsystems.com/limiting-vibration-issues-vertical-turbine-pumps> >
- Erbessd, Thierry. 2020. 3 Tips for Diagnosing Resonance and 6 Ways to Correct it Coming Next, <URL: <https://www.cbmconnect.com/resonance-natural-frequency/> >.
- 330500 Velomitor Piezo-velocity Sensor Datasheet. 2020. Brosur Baker Hughes Bently Nevada. Nevada, USA.
- Operation Manual 330500 Velomitor Sensor. 1991. Manual General Electric Bently Nevada. Nevada, USA.
- Proximity Probes Explained. 2022. Brosur Connection Technology Center (CTC), Inc. New York. USA.
- Understanding Accelerometer Vibration Sensor – Piezoelectric VS MEMS. 2022. White Paper Sensata Technology, Inc. Massachusetts, USA.
- Accelerometer Installation and Operation. Brosur Pruftechnik. Ismaning. Germany.
- Sularso, & Tahara, H. 2000. Pompa & Kompresor: Pemilihan, Pemakaian, dan Pemeliharaan. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Rao, S. S. (2018). Mechanical Vibrations (6th ed.). Pearson Education