

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif. Pendekatan kuantitatif digunakan karena penelitian ini berfokus pada analisis data numerik berupa *data sheet* spesifikasi dari manufaktur, parameter operasi pompa, dan data getaran yang terukur secara objektif, seperti nilai amplitudo vibrasi, frekuensi dominan, debit aliran, serta tekanan *suction discharge* aktual operasi.

Penelitian ini bersifat analisis komparatif, yaitu membandingkan dua alternatif teknis, berupa pengoperasian pompa dengan *impeller* hasil *re-rate* dan pengoperasian pompa secara paralel. Perbandingan dilakukan berdasarkan spesifikasi manufaktur, parameter operasi, dan performa pompa.

3.2 Objek Penelitian

Objek penelitian pada tugas akhir ini adalah pompa sentrifugal multi stage dengan tag number 213-P-002 A dan 213-P-002 B yang beroperasi di Unit 213 Tatoray PT Trans Pacific Petrochemical Indotama, Tuban. Pompa ini berfungsi untuk memindahkan fluida hidrokarbon aromatik dari *pressure vessel* 213-V-001 menuju ke *heat exchanger* 213-E-002 dan memiliki peran penting dalam menjaga kontinuitas operasi unit.

Pompa 213-P-002 A/B merupakan pompa sentrifugal tipe *horizontal* bertingkat yang dirancang sesuai standar API 610 dan digerakkan oleh motor listrik dengan daya 470 KW. Pompa ini sebelumnya telah mengalami modifikasi pada proyek '*Revamp*' di tahun 2023 berupa *re-rate impeller*, yaitu mengganti ukuran diameter *impeller* menjadi lebih besar untuk memenuhi kebutuhan laju aliran tinggi pada kondisi produksi *high demand*.

Namun pada kondisi aktualnya, pompa lebih sering dioperasikan dalam kondisi operasi *low demand* dimana laju aliran yang dibutuhkan tidak setinggi prediksi yang dilakukan sebelum proyek *revamp*, sehingga pompa menunjukkan indikasi ketidakstabilan operasi berupa peningkatan level vibrasi dan permasalahan aliran, sehingga menjadikannya objek yang relevan untuk dilakukan analisis teknis lebih lanjut.

Tabel 3. 1 Perbandingan kebutuhan operasi sebelum dan sesudah *Revamp* sesuai perhitungan tim engineering perusahaan

Performance Data vs Pump Tag Number		213-P-002 A/B			
		<i>Datasheet Awal</i>	<i>Revamp / UOP Datasheet</i>	PGTR	Req Operation
Q	TPH	-	-	-	269,74
	m ³ /h	251	369	312	309,3171263
H	m	478	502,4	541,098246	493,5
SG	-	0,705	0,708	0,8723	0,87205
ρ	kg/m ³	705	708	872,3	872,05
g	m/s ²	9,81	9,81	9,81	9,81

Sumber: Data diolah dari PT.TPPI

3.3 Jenis dan Sumber Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder, dengan rincian sebagai berikut:

Tabel 3. 2 Jenis dan sumber data penelitian

Jenis Data	Nama Data	Deskripsi Data	Keterangan
Data Primer	Data vibrasi pompa	Nilai vibrasi Spektrum vibrasi Nilai amplitudo <i>blade pass frequency</i> Nilai <i>peakvue</i> Spektrum <i>peakvue</i>	Pengukuran langsung di lapangan.

	Data parameter operasi pompa	Laju aliran Tekanan <i>suction discharge</i>	Data kondisi operasi saat pengukuran vibrasi.
Data Sekunder	<i>Datasheet</i> desain manufaktur	Data spesifikasi pompa awal Data spesifikasi pompa untuk <i>revamp</i> Kurva performa pompa awal Kurva performa pompa <i>revamp</i>	Diperoleh dari dokumen dan catatan perusahaan.
	Data historis operasi pompa	Nilai vibrasi sebelum <i>revamp</i> Nilai vibrasi setelah <i>revamp</i> Parameter operasi pompa sebelum <i>revamp</i> Parameter operasi pompa setelah <i>revamp</i>	Diperoleh dari dokumen dan catatan perusahaan.
	Standar dan referensi teknis terkait	API 610	Digunakan sebagai acuan limitasi parameter operasi dan vibrasi yang diizinkan.

Sumber: Data diolah dari PT.TPPI

Data-data tersebut digunakan sebagai dasar dalam analisis karakteristik operasi dan perbandingan alternatif pengoperasian pompa.

3.4 Metode Pengambilan Data

Pengambilan data vibrasi dilakukan pada pompa 213-P-002 A/B dalam berbagai kondisi operasi pompa sesuai dengan kondisi proses yang berlaku. Pengukuran vibrasi dilakukan menggunakan *Vibration Analyzer CSI 2140 Emerson* yang dilengkapi dengan sensor *Accelerometer*. Pengukuran vibrasi dilakukan pada *bearing housing* pompa dan motor dengan arah yang disarankan dalam API 610 berikut:

- *Horizontal (H)* sisi *Inboard* dan *Outboard* Pompa-Motor.
- *Vertikal (V)* sisi *Inboard* dan *Outboard* Pompa-Motor.
- *Aksial (A)* sisi *Inboard* dan *Outboard* Pompa-Motor.

Titik pengukuran mengacu pada rekomendasi API 610 dan praktik standar pemantauan kondisi peralatan putar. Parameter vibrasi yang diukur meliputi:

- Nilai vibrasi dalam bentuk *velocity* RMS (mm/s RMS)
- Spektrum vibrasi menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT)
- Nilai *peakvue* dalam bentuk *acceleration* RMS (G's RMS)
- Spektrum *peakvue*

Selain data vibrasi, dicatat pula parameter operasi pompa yang berhubungan dengan pembahasan dan analisa performa pompa yaitu data debit aliran untuk memastikan keterkaitan antara kondisi operasi dan respon getaran.

3.5 Metode Analisis Hidrolik Fluida Pompa

Analisis hidrolik pompa dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian operasi pompa terhadap kurva desain dan kebutuhan sistem. Analisis meliputi:

1. Evaluasi kurva *head-flow* pompa sebelum dan sesudah *re-rate impeller* untuk mengidentifikasi *Best efficiency point* (BEP) dan *Preffered operating region* (POR).
2. Evaluasi kurva *head-flow* pompa sebelum dan sesudah *re-rate impeller* untuk mengidentifikasi nilai head pompa terhadap perubahan *flow* pompa.
3. Evaluasi hasil *re-rate impeller* terhadap kondisi operasi *low flow* atau operasi diluar range spesifikasi pompa untuk mengidentifikasi potensi terjadinya fenomena hidrolik tidak stabil seperti kavitasi, *recirculation*, peningkatan vibrasi, dan penurunan efisiensi pompa.

Hasil analisis hidrolik ini digunakan sebagai dasar untuk mengaitkan kondisi operasi dengan peningkatan vibrasi yang teramati serta dasar untuk perbandingan alternatif yang tersedia.

3.6 Metode Analisis Getaran

Analisis getaran dilakukan dengan mengacu pada standar ISO 10816-1 dan praktik *condition monitoring* pada peralatan putar. Data vibrasi yang diperoleh dianalisis dalam domain waktu dan domain frekuensi FFT.

Analisis domain waktu digunakan untuk mengamati pola *waveform* dan mendeteksi impuls frekuensi tinggi yang berkaitan dengan fenomena kavitasi. Analisis domain frekuensi dilakukan menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk mengidentifikasi frekuensi dominan yang berkaitan dengan:

- Putaran pompa (1x RPM dan harmoniknya).
- *Blade pass frequency*.
- Frekuensi *non-synchronous* akibat *Flow induced vibration*.

Selain itu, dilakukan juga analisa spektrum envelope peakVue untuk mendeteksi indikasi kavitasi yang terjadi pada pompa saat dioperasikan dengan impeller sebelum dan sesudah re-rate.

3.7 Metode Evaluasi Alternatif Operasi Paralel

Pengoperasian pompa secara paralel menggunakan impeller sebelum re-rate belum pernah diterapkan pada kondisi aktual, sehingga opsi tersebut diperlakukan sebagai studi analitis.

Studi ini didukung oleh data performa hidrolik dan parameter vibrasi pompa sebelum dilakukan re-rate impeller, di mana pompa beroperasi dalam rentang preferred operating region (POR) impeller lama dengan karakteristik vibrasi yang stabil dan dapat diterima.

Analisis pengoperasian paralel dilakukan dengan pada level kinerja pompa secara individual sehingga

perbandingan antara alternatif re-rate impeller dan pengoperasian paralel dilakukan secara analitis dan komparatif, menggunakan data aktual operasi pompa pada kondisi impeller lama sebagai representasi perilaku pompa apabila dioperasikan baik secara tunggal (low flow) maupun paralel (high flow) sebagai berikut:

1. Kesesuaian karakteristik hidrolik (sebelum re-rate) dengan kebutuhan sistem
2. Posisi titik operasi terhadap BEP dan POR
3. Level dan pola vibrasi pompa
4. Stabilitas dan keandalan operasi pompa

Setiap alternatif dianalisis secara terpisah berdasarkan data hidrolik dan vibrasi yang diperoleh. Hasil analisis kemudian dibandingkan secara kuantitatif untuk menentukan alternatif yang:

1. Memiliki tingkat vibrasi lebih rendah
2. Beroperasi lebih dekat dengan BEP
3. Memiliki keandalan yang lebih tinggi.

Alternatif dengan performa teknis paling stabil dipilih sebagai opsi yang paling sesuai untuk kondisi operasi pompa 213-P-002 A/B.

3.8 Metode Analisis Keandalan Pompa Dengan *Mean time between failure* (MTBF)

3.8.1 Sumber Data MTBF

Data yang digunakan untuk analisis MTBF pada penelitian ini diperoleh dari data historis operasi dan perawatan pompa 213-P-002 A/B yang terdokumentasi dalam sistem pemeliharaan perusahaan. Data tersebut mencakup riwayat kegagalan, aktivitas perawatan tidak terencana yang berkaitan langsung dengan gangguan operasional pompa, serta tanggal saat dilakukan perbaikan.

Periode data yang digunakan disesuaikan dengan ketersediaan dan konsistensi catatan, sehingga mampu merepresentasikan kondisi operasi pompa sebelum dan sesudah penerapan strategi operasi tertentu, yaitu data sebelum penggunaan *impeller* hasil *re-rate* dan data setelah penggunaan *impeller* hasil *re-rate*. Data historis ini digunakan sebagai dasar untuk menghitung interval waktu antar kegagalan yang menjadi komponen utama dalam perhitungan MTBF.

3.8.2 Definisi Kegagalan (*Failure Criteria*)

Dalam analisis MTBF, diperlukan definisi kegagalan yang jelas dan konsisten agar hasil perhitungan dapat merepresentasikan kondisi keandalan pompa secara akurat. Pada penelitian ini, kegagalan (*failure*) didefinisikan sebagai kejadian yang menyebabkan pompa tidak dapat beroperasi sesuai fungsi yang diharapkan dan memerlukan tindakan perawatan tidak terencana.

Kriteria kegagalan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Kegagalan fungsional yang menyebabkan pompa tidak dapat beroperasi sesuai dengan fungsi desainnya sehingga memerlukan tindakan perbaikan atau penggantian komponen
2. Kegiatan perawatan bersifat *condition based* yang dilakukan saat kondisi pompa yang tidak memenuhi syarat sehingga perlu dilakukan tindakan perbaikan.

Kegiatan perawatan preventif terjadwal tidak dikategorikan sebagai kegagalan dalam perhitungan MTBF. Dengan batasan ini, nilai MTBF yang diperoleh mencerminkan keandalan operasional pompa terhadap gangguan yang bersifat tidak terencana dan berkaitan langsung dengan kondisi operasi aktual.

3.8.3 Metode Perhitungan MTBF

Perhitungan *Mean time between failure* (MTBF) dilakukan dengan menggunakan metode statistik sederhana yang umum digunakan dalam analisis keandalan peralatan putar. MTBF dihitung sebagai rasio antara total waktu operasi pompa terhadap jumlah kejadian kegagalan dalam periode pengamatan tertentu, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$MTBF = \theta = \frac{\text{Total Up Time}}{\text{Number of Failures (Down Time)}} \quad (3.1)$$

Total waktu operasi dihitung berdasarkan akumulasi jam operasi pompa selama periode pengamatan, sedangkan jumlah kegagalan ditentukan berdasarkan kriteria kegagalan yang telah didefinisikan sebelumnya. Perhitungan MTBF dilakukan secara terpisah untuk setiap skenario operasi, yaitu:

- Pengoperasian pompa sebelum *impeller* hasil *re-rate*
- Pengoperasian pompa setelah *impeller* hasil *re-rate*

Pendekatan ini memungkinkan perbandingan nilai MTBF antar skenario operasi secara langsung. MTBF pada penelitian ini digunakan sebagai indikator keandalan relatif, sehingga fokus analisis bukan pada nilai absolut MTBF, melainkan pada perbedaan tren keandalan yang muncul akibat perbedaan karakteristik operasi pompa.

3.8.4 Hubungan antara Nilai MTBF dengan Performa Vibrasi Pompa

Hasil analisa performa vibrasi pompa sebelum dan sesudah *re-rate* diperkuat dengan evaluasi nilai MTBF sebagai bukti nyata bahwa kondisi gangguan hidrolis aliran pada pompa berpengaruh terhadap

keandalan pompa pada kondisi sebelum re-rate dengan setelah re-rate.

3.9 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian disusun untuk menggambarkan tahapan penelitian secara sistematis, mulai dari identifikasi permasalahan hingga penarikan kesimpulan. Diagram ini memastikan bahwa seluruh proses penelitian dilakukan secara terstruktur dan dapat ditelusuri.



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

Berikut rincian diagram alir penelitian dari gambar 3.1 diatas.

1. Identifikasi Permasalahan

- Peningkatan vibrasi pompa
 - Operasi pada kondisi *low flow*
 - Dampak *re-rate impeller*
2. Studi Literatur
 - Penelitian terdahulu
 - Pompa sentrifugal
 - *Re-rate impeller*
 - Operasi paralel
 - Analisis vibrasi dan kavitas
 3. Pengumpulan Data
 - Data desain dan spesifikasi pompa
 - Data operasi aktual
 - Data vibrasi (FFT dan *waveform*)
 4. Analisis Performa Pompa
 - Kurva performa pompa sebelum dan setelah *re-rate*
 - Evaluasi BEP dan POR
 - Evaluasi level vibrasi
 - Analisis FFT dan *waveform*
 - Diagnosis sumber getaran
 5. Evaluasi Keandalan Pompa
 - Stabilitas operasi melalui nilai MTBF kedua mode operasi
 - Risiko kavitas dan vibrasi
 6. Perbandingan Alternatif Operasi
 - *Re-rate impeller*
 - Operasi pompa paralel
 7. Penarikan Kesimpulan dan Rekomendasi