

**EXPERIMENTAL STUDY ON ROTOR BALANCING AND STRUCTURAL REPAIR
 METHOD TO OVERCOME UNBALANCE AND STRUCTURAL LOOSENESS IN
 CENTER HUNG MACHINES**

(Studi Eksperimen Perbandingan Rotor Balancing dan Perbaikan Struktur dalam Mengatasi Permasalahan Unbalance dan Structural Looseness pada Mesin Tipe Center Hung)

Andi Kurniawan^{1*}

ABSTRACT

Unbalance and structural looseness are problems in industrial machines that can amplify the machine's vibration level if they occur simultaneously. Experimental study was done by comparing rotor balancing and machine's structural repair methods in dealing with unbalance and structural looseness problems. The investigated equipment in this study consists of rotor and disk which represent center hung machines in industries such as fans, blowers, pumps and others. A comparison was made between the rotor balancing and structural repairs under the same initial problem conditions and vibration levels. The result of this study indicate that structural repair reduced machine vibration at higher level compared to rotor balancing. Even when the specimens were subjected to unbalance problems again, the increase in machine vibration level, which was previously improved by structural repairmen is not excessively high.

Keywords: *Unbalance, Structural Looseness, Rotor Balancing, Structural Repair, Center Hung Machines*

PENDAHULUAN

Vibrasi yang terjadi pada mesin sangat berpengaruh terhadap keandalan dan performa dari mesin. Vibrasi yang berlebihan pada mesin dapat menurunkan kinerja mesin dan berpotensi menimbulkan permasalahan yang serius. Oleh karena itu perlu dilakukan tindakan

¹ UPDL Suralaya, PLN PUSDIKLAT, Indonesia

*Corresponding author:
 andi.kurniawan.pln@gmail.com

untuk mencegah kerusakan serius akibat vibrasi yang berlebih, salah satunya adalah melalui analisa vibrasi (Mobley, 2002). Analisa vibrasi dilakukan dengan mengumpulkan data-data vibrasi mesin dan kemudian dianalisa untuk mengetahui permasalahan yang menjadi penyebab vibrasi (Randall, 2011). Tindakan korektif yang dilakukan untuk menurunkan nilai vibrasi cukup beragam dan tergantung dari permasalahan yang menjadi penyebab timbulnya vibrasi. Banyak hal yang dapat menyebabkan naiknya nilai vibrasi pada mesin, namun permasalahan umum yang sering terjadi adalah *unbalance* pada rotor (Kv, 2015). *Unbalance* adalah kondisi dimana terdapat gaya yang tidak seimbang pada rotor karena adanya distribusi massa yang tidak merata (Puftechnick, 2022). Rotor *unbalance* bisa terjadi pada mesin yang berukuran kecil seperti pompa, *blower*, *pulley*, hingga mesin-mesin yang berukuran besar seperti turbin PLTU, *fan*, dan kompressor. Pada suatu mesin biasanya terdapat dua atau lebih permasalahan yang menjadi penyebab timbulnya vibrasi. Permasalahan tersebut bisa saling memperkuat nilai vibrasi mesin (Knoxville, 2002). Salah satu permasalahan yang bisa memperkuat nilai vibrasi adalah *stuctural looseness* (Xyobalancer, 2023). *Structural looseness* adalah lemahnya bagian tertentu pada stuktur mesin karena adanya keretakan pada sambungan, baut kendur, atau kurangnya *stiffness* dari struktur mesin.

Rotor *unbalance* dan *structural looseness* merupakan topik penelitian yang menarik, sehingga mengundang perhatian peneliti dari berbagai kalangan. Penelitian yang dilakukan oleh Saleem et al (Saleem, 2012) menyatakan bahwa *unbalance* akan menyebabkan perubahan defleksi pada poros. Mogal dan Lalwani (Lalwani, 2015) melakukan studi eksperimen dari permasalahan *unbalance* dan mendapatkan hasil bahwa nilai vibrasi *overall* arah horisontal lebih tinggi dari pada arah vertikal, sedangkan dari pengukuran phase pada *bearing* didapatkan hubungan *phase* horisontal dan vertikal berbeda $90^{\circ} \pm 30^{\circ}$. Kemudian pada data spektrum, vibrasi dominan terjadi pada orde pertama Kumar, dkk, 2012). Sementara itu, studi yang dilakukan oleh Kurniawan (Kurniawan, 2021) menyatakan bahwa *looseness* pada mesin yang mengalami *unbalance* akan menyebabkan perubahan nilai vibrasi mesin. Muszynska dan Goldman (Goldman, 1995) melakukan simulasi numerik terhadap respon dinamik rotor yang memiliki *unbalance* dan *looseness*, dan mendapatkan hasil bahwa keduanya memiliki memiliki *peak* dominan 1x rpm pada grafik spektrum. Meskipun pola vibrasi yang dihasilkan sangat mirip, tetapi metode perbaikan yang dilakukan untuk mengatasi masalah *rotor unbalance* dan *structural looseness* sangat berbeda. Rotor *unbalance* dapat diatasi menggunakan metode *balancing*, yaitu dengan menempatkan massa penyeimbang pada rotor agar distribusi massa

merata dan nilai vibrasi mesin turun sampai batas yang diijinkan (ISO 1940-1). Ada beberapa metode dalam pelaksanaan rotor *balancing*, yaitu *single plane balancing* dengan perhitungan vektor (Berry, 2001), *single plane balancing* dengan *four run balancing* (Gencogle, dkk, 2021), *dual plane balancing* dan *multi plane balancing*. Sedangkan perbaikan *structural looseness* pada mesin membutuhkan tahapan yang lebih kompleks dibandingkan dengan rotor *balancing*. Perbaikan diawali dengan deteksi bagian yang lemah dari struktur mesin melalui analisa *cross phase* (Barringer, 2013), *modal analysis* (Chandravanshi, 2013) dan *Operating Deflection Shape* (Price, 2019). Tindakan perbaikan yang dilakukan untuk mengatasi permasalahan *structural looseness* disesuaikan dengan hasil temuan dari deteksi sebelumnya, diantaranya adalah dengan mengencangkan bagian mesin atau struktur yang kendur, menyesuaikan *damping*, memperkuat ikatan antar sambungan atau dengan menambah *stiffness* dari struktur mesin (Scheffer, 2004).

Penelitian yang membahas mengenai perbandingan antara rotor *balancing* dan perbaikan struktur dalam mengurangi nilai vibrasi mesin belum pernah dilakukan sebelumnya. Sehingga dalam penelitian ini dilakukan studi eksperimental untuk membandingkan pengaruh rotor *balancing* dan perbaikan struktur dalam menurunkan nilai vibrasi mesin. Penelitian ini akan menggunakan spesimen uji berupa mesin yang merepresentasikan mesin-mesin *center hung* yang umum digunakan di industri, seperti *fan*, *blower*, turbin, pompa dan mesin lainnya. Spesimen uji akan diberikan permasalahan berupa *unbalance* dan *structural looseness* dan kemudian dilakukan tindakan perbaikan berupa rotor *balancing* dan perbaikan struktur yang dilakukan secara bergantian. Pengukuran nilai vibrasi mesin akan dilakukan sebelum dan setelah tindakan perbaikan.

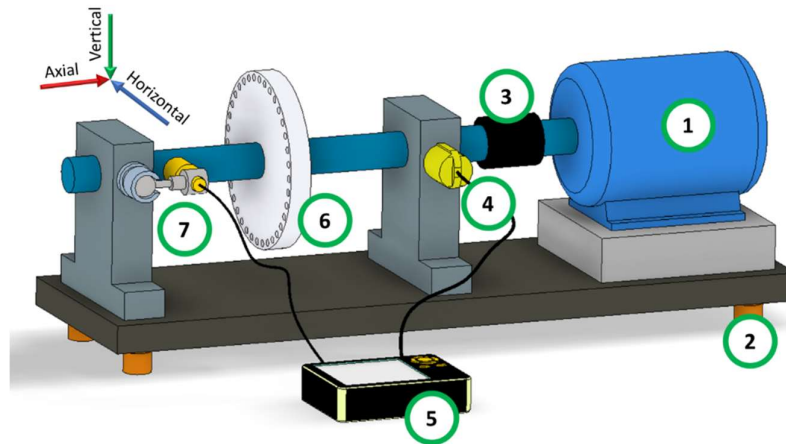
Pada kenyataannya di industri terkadang mesin-mesin seperti *fan* atau *blower* yang sudah dilakukan perbaikan kembali mengalami *unbalance* karena adanya endapan kotoran yang menempel pada *blade*. Penelitian ini juga akan mensimulasikan kondisi yang sama. Setelah perbaikan berupa rotor *balancing* dan perbaikan struktur selesai dilakukan, spesimen uji akan kembali diberikan massa *unbalance*. Pengukuran nilai vibrasi akan kembali dilakukan dan hasilnya akan dibandingkan dengan nilai vibrasi sebelumnya, sehingga dapat diketahui jenis perbaikan mana yang lebih tahan terhadap adanya permasalahan baru. Hasil dari studi eksperimen ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai kelebihan dan kekurangan dari metode *balancing* dan perbaikan struktur dalam menurunkan nilai vibrasi mesin.

METODE

Studi eksperimental ini menggunakan spesimen berupa mesin yang terdiri dari motor induksi dengan daya 400 W yang dihubungkan dengan *disk* melalui kopling. *Disk* terbuat dari bahan plastik dengan diameter 200 mm dan terpasang secara *center hung* pada rotor yang memiliki panjang 300 mm. *Bearing* yang digunakan adalah *anti friction ball bearing* dengan jarak *antar bearing* sebesar 220 mm. Pada *disk* terdapat lubang sebanyak 36 buah yang akan digunakan untuk menempatkan massa *unbalance*. Pada percobaan ini motor akan dioperasikan pada kecepatan konstan di 1487 rpm. Percobaan ini akan menggunakan tujuh buah spesimen yang identik untuk melihat konsistensi data vibrasi dari tiap tahap pengujian.

Pengukuran vibrasi dilakukan menggunakan *dual channel data collector* VibXpert II dengan sensor *accelerometer* yang dipasang secara *magnetic mounting* dengan *range frequency* pengukuran 1 Hz sampai 20 kHz. Data vibrasi yang diukur adalah nilai vibrasi *overall*, spektrum, dan *cross phase*. Kemudian pelaksanaan *balancing* akan dilakukan menggunakan fitur *balancing* yang tersedia pada Vibxpert II, dengan tambahan peralatan berupa *laser trigger sensor* dan *reflective tape* untuk mengukur rpm mesin dan *phase unbalance*. Peralatan lain yang digunakan pada proses *balancing* adalah timbangan yang memiliki ketelitian pengukuran 0.01 gram, yang digunakan untuk mengukur massa *trial* dan *correction weight*.

Percobaan ini dimulai dengan memberikan permasalahan *unbalance* dan *structural looseness* pada mesin. Permasalahan *unbalance* disimulasikan dengan menempatkan massa sebesar 7.5 gram di sudut 0° pada lubang *disk*. Selanjutnya permasalahan *structural looseness* diberikan ke mesin dengan mengubah kekakuan mesin melalui pengaturan baut penyangga *baseplate* seperti yang dapat dilihat pada gambar 1 di nomor 2. Langkah ini dilakukan sampai didapatkan nilai vibrasi tertinggi yang tertampil pada alat pengukur vibrasi. Untuk memastikan peralatan mengalami *structural looseness*, pengukuran *cross phase channel* dilakukan pada *bearing disk inboard* arah horisontal dan vertikal, serta pada *base plate* dan pondasi. *Structural looseness* ditandai dengan hasil pengukuran *phase* di *bearing* arah horisontal dan vertikal bernilai $0^\circ \pm 30^\circ$ atau $180^\circ \pm 30^\circ$, serta *base plate* dan pondasi bernilai lebih dari $0^\circ \pm 30^\circ$ [19]. Nilai vibrasi dari masing-masing mesin kemudian dicatat sebagai data vibrasi awal. Untuk mengetahui pengaruh masing-masing metode perbaikan dalam menurunkan nilai vibrasi mesin yang disebabkan oleh permasalahan *unbalance* dan *structural looseness*, maka pelaksanaan *rotor balancing* dan perbaikan struktur akan dilakukan secara bergantian.



Gambar 1. Konfigurasi Spesimen Uji. 1, Motor Listrik ; 2, Pengatur Kekakuan *Baseplate* ; 3, Kopling Fleksibel; 4, Sensor Akselerometer; 5, Peralatan pengukur vibrasi dan *balancing*; 6, *Disk* ; 7, Pengukur *phase*

Perbaikan pertama yang dilakukan adalah *single plane rotor balancing* dengan menambahkan *correction weight* pada *disk* sehingga nilai vibrasi mesin turun. Fokus utama dari pelaksanaan *balancing* ini adalah memastikan distribusi massa yang merata pada disk. *Single plane balancing* dilakukan dengan metode vektor. Pelaksanaan *balancing* dimulai dengan pengukuran nilai vibrasi pada disk inboard arah horisontal dan sudut *phase* yang diukur menggunakan laser *tachometer*. *Trial Weight* kemudian dipasang pada posisi yang berlawanan dengan sudut *phase* dari *unbalance*. Pengukuran vibrasi dan sudut *phase* kembali dilakukan setelah pemasangan *trial weight* untuk mengetahui respon dari rotor. Penentuan nilai massa penyeimbang atau *Correction Weight* (CW) serta posisi penempatannya pada disk akan dilakukan melalui perhitungan vektor. Tahapan selanjutnya adalah melepas *Trial Weight* dan menempatkan massa *Correction Weight* sesuai hasil perhitungan. Setelah selesai melakukan *balancing*, pengukuran vibrasi *overall* kembali dilakukan untuk mengetahui penurunan nilai vibrasi mesin. Data *cross phase* juga diukur untuk mengetahui apakah metode *balancing* juga bisa mengatasi permasalahan *structural looseness*.

Tahapan selanjutnya adalah menguji pengaruh adanya permasalahan baru yang diberikan ke spesimen setelah rotor *balancing* selesai dilakukan. Spesimen uji akan diberikan

gaya *unbalance* tambahan melalui penambahan massa seberat 4.5 gram pada disk di sudut 90° . Pengukuran vibrasi kemudian dilakukan untuk mengetahui seberapa besar nilai vibrasi mesin karena *unbalance* tambahan ini.

Setelah itu kondisi mesin akan dikembalikan ke kondisi awal dengan melepas massa *Correction Weight (CW)* dan massa *unbalance* tambahan, sehingga mesin kembali mengalami *unbalance* dan *structural looseness*. Langkah selanjutnya adalah melakukan perbaikan struktur. Fokus utama dari perbaikan struktur adalah untuk memperbaiki bagian dari struktur mesin yang lemah. Pada penelitian ini bagian mesin yang dibuat lemah adalah pada *base plate* mesin, sehingga metode perbaikan struktur dilakukan dengan mengubah kekakuan *base plate*. Proses ini dilakukan ketika mesin dioperasikan, yaitu dengan mengatur baut penyangga *base plate* sehingga nilai vibrasi *overall* turun dan *cross phase bearing* horisontal-vertikal bernilai $90^\circ \pm 30^\circ$, serta *cross phase baseplate-pondasi* bernilai $0^\circ \pm 30^\circ$.

Pengujian respon mesin terhadap gaya *unbalance* tambahan juga akan dilakukan setelah perbaikan struktur selesai dilakukan. Sama seperti langkah sebelumnya, gaya *unbalance* yang baru ini didapatkan dengan menambahkan massa *unbalance* seberat 4.5 gram pada disk di sudut 90° . Pengukuran vibrasi mesin juga akan dilakukan setelah tahapan ini. Hasil pengukuran vibrasi dari masing-masing metode perbaikan akan disajikan dalam bentuk grafik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran awal dilakukan pada *bearing disk inboard* dan *baseplate* serta pondasi setelah mesin diberikan permasalahan *unbalance* dan *structural looseness*. Data yang diukur pada *bearing Disk Inboard* adalah nilai vibrasi *overall* arah horisontal dan vertikal, *cross phase* horisontal dan vertikal, dan data spektrum arah horisontal. Sedangkan pada *baseplate* dan pondasi dilakukan pengukuran *cross phase*. Hasil pengukuran data vibrasi awal dari masing-masing spesimen dapat dilihat pada tabel 1. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa semua spesimen mengalami vibrasi yang tinggi pada arah horisontal. Perbandingan vibrasi arah horisontal dan vertikal dari semua spesimen menunjukkan nilai yang lebih besar dari 4:1. Selanjutnya nilai *cross phase* pada *bearing* arah horisontal dan vertikal dari semua spesimen menunjukkan nilai $0^\circ \pm 30^\circ$ atau $180^\circ \pm 30^\circ$. Kemudian pengukuran *cross phase baseplate* dan pondasi menunjukkan nilai lebih besar dari $0 \pm 30^\circ$. Berry J.E. (2021) menyatakan bahwa hal tersebut merupakan indikasi dari adanya *structural looseness* pada spesimen uji.

Tabel 1. Data awal pengukuran vibrasi dan *phase* sebelum pelaksanaan *balancing* dan perbaikan struktur

Spesimen	Vibrasi <i>Overall</i> (mm/s - rms)		Perbandingan vibrasi H dan V	<i>Phase</i> Horizontal - Vertikal (°)
	Horizontal	Vertikal		
1	18.5	2.58	7.2 : 1	194
2	19.5	4.41	4.4 : 1	216
3	20.13	2.58	7.8 : 1	187
4	22.9	1.3	17.6 : 1	353
5	20.92	3.26	6.4 : 1	213
6	18.4	2.7	6.8 : 1	28
7	18.6	2.6	7.2 : 1	335

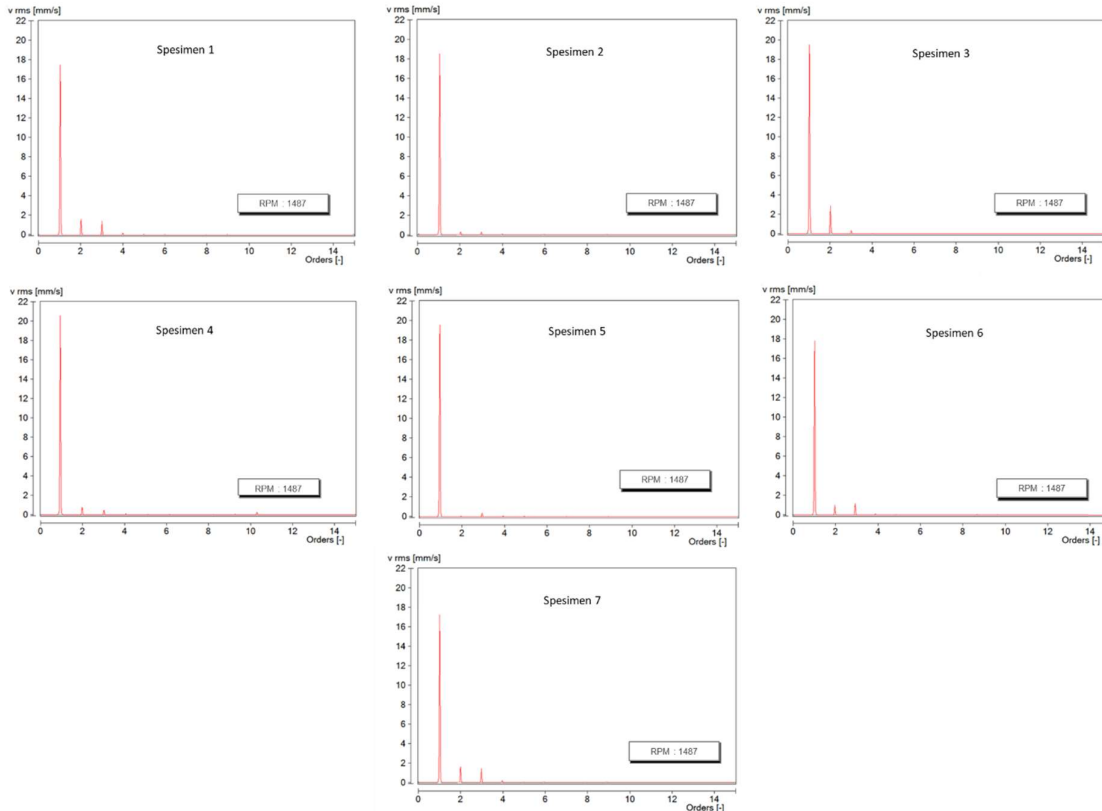
Selanjutnya untuk membuktikan adanya permasalahan *unbalance* pada spesimen, maka dilakukan pengukuran spektrum vibrasi. Data spektrum vibrasi dari masing-masing spesimen dapat dilihat pada gambar 2. Pada grafik spektrum vibrasi tersebut dapat dilihat bahwa terdapat kesamaan pola vibrasi dari masing-masing spesimen, yaitu terdapat *peak* vibrasi yang sangat tinggi di frekuensi 1x order sedangkan *peak* vibrasi pada frekuensi yang lain nilainya sangat kecil. Hal tersebut menandakan bahwa pada spesimen terdapat sumber vibrasi yang menghasilkan getaran tiap satu kali putaran poros. Permasalahan *unbalance* juga akan menghasilkan getaran sebanyak satu kali setiap putaran poros (Gencoglu S, et.al, 2021). Hal tersebut merupakan indikasi yang kuat adanya *unbalance* pada spesimen.

Sehingga berdasarkan pengukuran awal tersebut, dapat disimpulkan sementara bahwa spesimen uji mengalami permasalahan berupa *unbalance* dan juga *structural looseness*. Data awal ini akan dibandingkan dengan data hasil perbaikan dengan metode *balancing* dan perbaikan struktur pada langkah berikutnya.

1. *Balancing*

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, pelaksanaan *balancing* pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode vektor. Vektor ini terdiri atas dua besaran, yaitu nilai vibrasi sebagai panjang vektor dan sudut *phase* sebagai sudut vektor. Vibrasi yang di ukur pada tahap

ini adalah vibrasi *bearing disk inboard* pada arah horisontal. Selanjutnya nilai vibrasi awal dalam proses *balancing* ini akan digambarkan sebagai vektor \vec{O} , vibrasi dari *trial weight* (TW) sebagai vektor $\vec{O} + \vec{T}$, dan vektor koreksi sebagai \vec{T} . Data *balancing* untuk spesimen 1 dapat dilihat pada tabel 2.

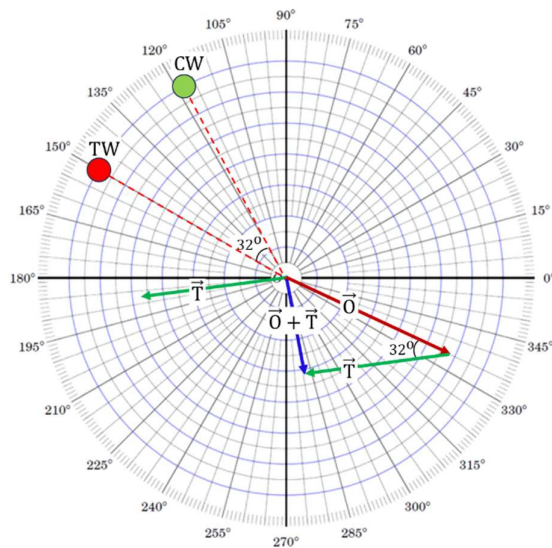


Gambar 2. Grafik spektrum vibrasi spesimen uji

Tabel 2. Data *Balancing* Spesimen 1

Spesimen	Amplitude	Phase (°)
Vektor \vec{O}	17.4 mm/s	335
Vektor $\vec{O} + \vec{T}$	9.4 mm/s	281
Trial Weight (TW)	4.50 gram	150

Perhitungan *Correction Weight* dan vektor data *balancing* dari tabel 2 dapat dilihat pada gambar 3.



$$\vec{T} = 14.2 \text{ mm/s}$$

$$CW = \frac{\vec{O}}{\vec{T}} \times TW = \frac{17.4}{14.2} \times 5.5$$

$$CW = 5.55 \text{ gram pada } 118^\circ$$

$$\text{Vibrasi overall setelah balancing} = 8.5 \text{ mm/s}$$

Gambar 3. Grafik polar vektor *balancing* spesimen 1

Nilai dan sudut *Correction Weight* sesuai hasil penggambaran vektor dan perhitungan pada Gambar 3 di atas kemudian ditempatkan pada spesimen 1. Nilai vibrasi spesimen 1 setelah dilakukan *rotor balancing* adalah 8.5 mm/s, sehingga dapat diketahui bahwa nilai vibrasi pada spesimen 1 berkurang setelah dilakukan *rotor balancing*. Pelaksanaan *balancing* untuk spesimen lainnya dilakukan dengan metode yang sama dengan spesimen 1. Kemudian data vibrasi dan *phase* setelah dilakukan *rotor balancing* untuk semua spesimen dapat dilihat pada tabel 2.

Ada beberapa informasi yang dapat diambil dari perbandingan vibrasi sebelum dan setelah *balancing* seperti yang tertera pada tabel 2. Pertama nilai vibrasi spesimen baik di arah horisontal maupun vertikal mengalami penurunan setelah pelaksanaan *balancing*. Akan tetapi walaupun nilainya turun, perbandingan vibrasi arah horisontal dan vertikal masih lebih besar dari 4:1. Kemudian nilai cross phase arah horisontal dan vertikal dari semua spesimen menunjukkan nilai $0^\circ \pm 30^\circ$ atau $180^\circ \pm 30^\circ$. Dimana hal ini menunjukkan bahwa masih ada *structural looseness* pada spesimen setelah dilakukan *rotor balancing*.

Tabel 2. Data vibrasi dan *phase* masing-masing spesimen setelah pelaksanaan *balancing*

Spesimen	Vibrasi Overall (mm/s - rms)		Perbandingan vibrasi H dan V	Phase Horizontal - Vertikal (°)
	Horizontal	Vertikal		
1	8.5	1.18	7.2 : 1	190
2	10.7	1.75	6.1 : 1	204
3	6.46	1.04	6.2 : 1	193
4	11.45	0.9	12.7 : 1	12
5	7.49	1.48	5.1 : 1	216
6	6.05	0.8	7.6 : 1	8
7	6.01	1.14	5.3 : 1	350

2. Perbaikan Struktur

Data vibrasi dan *phase* spesimen sebelum dan setelah dilakukan perbaikan struktur dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Data vibrasi dan *phase* masing-masing spesimen setelah perbaikan struktur

Spesimen	Vibrasi Overall (mm/s - rms)		Perbandingan vibrasi H dan V	Phase Horizontal - Vertikal (°)
	Horizontal	Vertikal		
1	7.5	2.69	2.8 : 1	87
2	5.6	2.9	1.9 : 1	107
3	5.18	2.46	2.1 : 1	103
4	5.9	2.6	2.3 : 1	72
5	5.97	2.5	2.4 : 1	112
6	4.1	1.5	2.7 : 1	93
7	4.2	2.4	1.8 : 1	80

Berdasarkan data yang ditampilkan pada tabel 3 dapat dilihat bahwa nilai vibrasi *overall* setelah dilakukan perbaikan struktur menunjukkan penurunan yang signifikan pada arah horizontal, sedangkan pada arah vertikal hanya beberapa spesimen yang nilai

vibrasinya turun. Kemudian perbandingan nilai vibrasi *overall* horisontal dan vertikal juga turun sehingga nilainya lebih kecil dari 4:1. Selain itu *cross phase* Horisontal-Vertikal dari semua spesimen bernilai $90^{\circ} \pm 30^{\circ}$ yang merupakan hubungan *phase* normal dari mesin yang mengalami *unbalance* (Barringer W, et.al, 2023). Sedangkan *cross phase baseplate* dan pondasi semua spesimen bernilai $0^{\circ} \pm 30^{\circ}$. Hal tersebut menandakan bahwa perbaikan struktur berhasil menurunkan nilai vibrasi dan menghilangkan permasalahan *structural looseness*.

Selanjutnya untuk melihat seberapa jauh penurunan nilai vibrasi antara *balancing* dan perbaikan struktur, maka nilai vibrasi hasil *rotor balancing* dan perbaikan struktur akan dibandingkan dengan nilai vibrasi awal. Perbandingan data vibrasi awal dan data vibrasi setelah perbaikan ditampilkan dalam persentase penurunan vibrasi dan dapat dilihat pada tabel 4.

Dari tabel 4 terlihat bahwa kedua metode perbaikan yang dilakukan dalam percobaan ini berhasil menurunkan nilai vibrasi spesimen yang mengalami permasalahan *unbalance* dan *structural looseness*. Berdasarkan perbandingan persentase penurunan vibrasi dari masing-masing metode, dapat diketahui bahwa perbaikan struktur lebih banyak menurunkan vibrasi mesin dibandingkan dengan rotor balancing. Dari 7 spesimen yang dilakukan pengujian, rata-rata penurunan vibrasi karena perbaikan struktur adalah 72.26%, sedangkan penurunan vibrasi karena *balancing* adalah 59.44%.

Tabel 4 Perbandingan Persentase penurunan nilai vibrasi antara metode *balancing* dan perbaikan struktur

3. Spesimen	Vibrasi Awal (mm/s - rms)	Balancing		Perbaikan Struktur	
		Vibrasi (mm/s - rms)	% Penurunan Vibrasi	Vibrasi (mm/s - rms)	% Penurunan Vibrasi
1	18.5	8.5	54.05%	7.5	59.46%
2	19.5	10.7	45.13%	5.6	71.28%
3	20.13	6.46	67.91%	5.18	74.27%
4	22.9	11.45	50.00%	5.9	74.24%
5	20.92	7.49	64.20%	5.97	71.46%
6	18.4	6.05	67.12%	4.1	77.72%
7	18.6	6.01	67.69%	4.2	77.42%

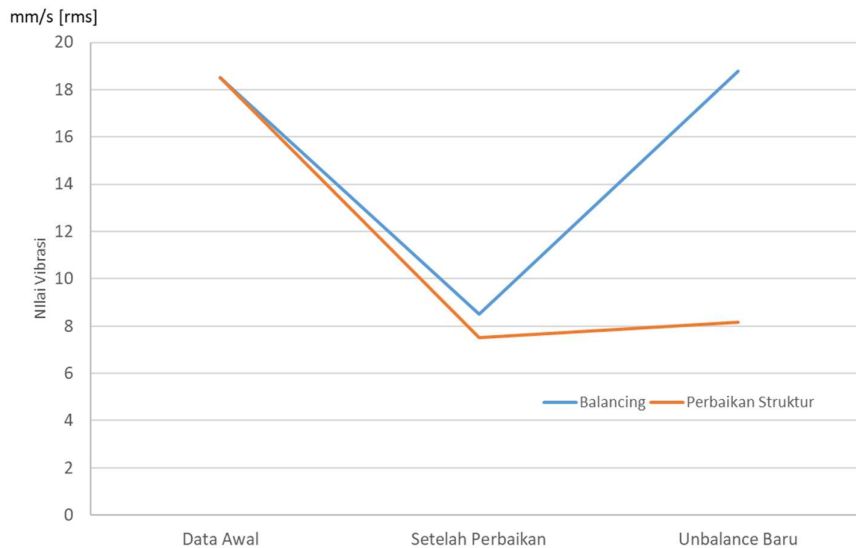
Penambahan Unbalance Setelah Perbaikan

Efek pemberian massa unbalance pada masing-masing spesimen setelah dilakukan perbaikan dengan metode *rotor balancing* dan perbaikan struktur dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5 Persentase kenaikan nilai vibrasi karena *unbalance* baru

Spesimen	Vibrasi <i>Awal</i> (mm/s- rms)	<i>Balancing</i>			Perbaikan Struktur		
		Vibrasi Overall (mm/s -rms)		% kenaikan vibrasi	Vibrasi Overall (mm/s -rms)		% kenaikan vibrasi
		Setelah perbaikan	<i>Unbalance</i> baru		Setelah perbaikan	<i>Unbalance</i> baru	
1	18.5	8.5	18.8	121.18	7.5	8.17	8.93
2	19.5	10.7	18.77	75.42	5.6	6.4	14.29
3	20.13	6.46	16.7	158.51	5.18	5.8	11.97
4	22.9	11.45	15.2	32.75	5.9	7.3	23.73
5	20.92	7.49	18.2	142.99	5.97	7.1	18.93
6	18.4	6.05	16.5	172.73	4.1	5.6	36.59
7	18.6	6.01	16.8	179.53	4.2	5.6	33.33

Perbandingan kenaikan vibrasi dari masing-masing spesimen setelah diberikan tambahan *unbalance* dapat dilihat pada gambar 5. Pada gambar 5 dapat dilihat bahwa dengan adanya penambahan gaya unbalance baru pada spesimen yang sebelumnya sudah dilakukan perbaikan dengan metode *rotor balancing* akan menyebabkan kenaikan vibrasi yang sangat tinggi. Sedangkan kenaikan vibrasi akibat adanya penambahan vibrasi pada spesimen yang telah di yang sebelumnya dilakukan perbaikan struktur tidak terlalu tinggi. Berdasarkan hal tersebut, dapat diketahui bahwa perbaikan struktur lebih efektif dalam menurunkan vibrasi mesin yang mengalami *unbalance* dan *structural looseness*. Bahkan setelah diberikan permasalahan baru, respon vibrasi dari mesin masih stabil dan tidak menunjukkan kenaikan nilai vibrasi yang tinggi.



Gambar 5. Grafik perbandingan persentase kenaikan vibrasi karena penambahan *unbalance* dari masing-masing metode perbaikan pada spesimen 1

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan, ada beberapa informasi yang didapatkan. Metode perbaikan *rotor balancing* maupun perbaikan struktur terbukti bisa menurunkan nilai vibrasi mesin yang mengalami permasalahan *unbalance* dan *structural looseness*. Perbedaan persentase penurunan vibrasi antara metode *rotor balancing* dan perbaikan struktur tidak berbeda jauh. Akan tetapi ketika mesin diberikan permasalahan baru berupa *unbalance*, nilai vibrasi mesin yang sebelumnya dilakukan perbaikan berupa *rotor balancing* akan mengalami kenaikan sangat tinggi. Sedangkan untuk mesin yang sebelumnya dilakukan perbaikan struktur, kenaikan vibrasi mesin tidak terlalu tinggi setelah diberikan *unbalance*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PT PLN (Persero) UPDL Suralaya yang telah memberikan dukungan hingga terwujudnya makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

R. K. Mobley, *An Introduction To Predictive Maintenance*, 2nd ed., vol. 42, no. 6. Woburn, United States of America: Butterworth-Heinemann, 2002.

- R. B. Randall, *Vibration-Based Condition Monitoring*. 2011.
- V. A. B. A. K. Kv, "Vibration Analysis: A Literature Review," *IOSR J. Electron. Commun. Eng. Ver. II*, vol. 10, no. 5, pp. 2278–2834, 2015, doi: 10.9790/2834-10523539.
- "Everything You Need to Know About Rotational Unbalance," *Puftechnick.com*, 2022. <https://blog.pruftechnik.com/rotational-unbalance/> (accessed Jul. 27, 2023).
- Advance Vibration Analysis*. Knoxville, USA: Computational Systems Incorporated, 2002.
- "Mechanical Looseness," *Perpetual Industries*, 2023. <https://xyobalancer.com/mechanical-looseness/#:~:text=Structural Looseness This form of mechanical looseness usually,vibration in the axis with the lesser stiffness.> (accessed Jul. 25, 2023).
- M. A. Saleem, "Detection of Unbalance in Rotating Machines Using Shaft Deflection Measurement during Its Operation," *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 3, no. 3, pp. 08–20, 2012, doi: 10.9790/1684-0330820.
- S. Mogal and D. Lalwani, "Experimental investigation of unbalance and misalignment in rotor bearing system using order analysis," *J. Meas. Eng.*, vol. 3, no. 4, pp. 114–122, 2015.
- B. K. Kumar, G. Diwakar, and M. R. S. Satynarayana, "Determination of Unbalance in Rotating Machine Using Vibration Signature Analysis," *Int. J. Mod. Eng. Res.*, vol. 2, no. 5, pp. 33415–33421, 2012.
- A. Kurniawan, "Pengaruh Looseness Terhadap Vibrasi Peralatan Yang Mengalami Unbalance Dan Misalignment," vol. 10, no. 1, pp. 138–145, 2021.
- A. Muszynska and P. Goldman, "Chaotic responses of unbalanced rotor/bearing/stator systems with looseness or rubs," *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 5, no. 9, pp. 1683–1704, 1995, doi: 10.1016/0960-0779(94)00171-L.
- ISO, "ISO 1940-1 - Mechanical vibration — Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state," vol. 2003, 2003.
- J. E. Berry and G. Ford, *Field Dynamic Balancing Using Portable Instruments*. 2001.
- S. Gencoglu, I. Bogrekci, and P. Demircioglu, "Case study of single plane balancing with four test run method," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, no. 13, pp. 40–45, 2021, doi: 10.1016/j.ifacol.2021.10.415.
- W. Barringer, "How to Use Vibration Analysis to Identify Equipment Problems." <https://www.reliableplant.com/Read/31055/how-to-use-vibration-analysis-to-identify-equipment-problems> (accessed Sep. 05, 2023).
- M. L. Chandravanshi and A. K. Mukhopadhyay, "Modal Analysis of Structural Vibration," no.

- November, 2013, doi: 10.1115/IMECE2013-62533.
- S. M. Price, "A comparison of Operating Deflection Shape and Motion Amplification Video Techniques for Vibration Analysis," *Turbomach. Pump Symp.*, 2019.
- C. Scheffer and P. Girdhar, *Practical Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance*, no. 1. Oxford: Newnes, 2004.
- J. E. Berry, *Concentrated Vibration Signature Analysis and Related Condition Monitoring Techniques*. Charlotte: Technical Associates of Charlotte, P.C., 1997.
- P. Vinh Dang, L. H. Toan Do, N. Thanh Vo, T. Nghi Ngo, and H. Nam Le, "Identification of Unbalance in Rotating Machinery Using Vibration Analyse Solution," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 841, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/841/1/012011.
- D. Whittle, "Phase Analysis: The Missing Weapon in The Fight Against Machine Downtime (Part II)," 2017. <https://www.maintenanceandengineering.com/2017/03/01/phase-analysis-the-missing-weapon-in-the-fight-against-machine-downtime-part-ii/>