

Studi Eksperimental Pengaruh *Misalignment* Poros Kopling pada Simulator PLTMH dengan Variasi Jumlah *Belt* terhadap Getaran dan Torsi Transmisi

Totok Widiyanto*, Sujono, Moch. Bagus Bahtiar, Hilmi Rizky Putra
Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Blora

INFORMASI NASKAH

Diterima : 13 Oktober 2025
Direvisi : 13 November 2025
Disetujui : 24 November 2025
Terbit : 25 November 2025

Email korespondensi:
jono1166@gmail.com

Laman daring:
<https://doi.org/10.37525/mz/2025-2/1584>

ABSTRAK

Penelitian ini membahas pengaruh *misalignment* poros kopling terhadap kinerja sistem transmisi *pulley* dan *belt* pada simulator Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) dengan variasi jumlah belt. Eksperimen dilakukan menggunakan motor listrik tiga fasa dengan daya 2,2 kW, sistem kopling, transmisi *pulley-belt*, serta unit turbin air *axial flow*. Data dikumpulkan melalui pengukuran kelurusan poros dengan dial indikator, analisis getaran menggunakan *vibration analyzer*, pengukuran temperatur komponen dengan infrared thermography, serta perhitungan torsi berdasarkan daya dan kecepatan putar pada rasio *pulley* 1:2. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi *misalignment* menghasilkan deviasi kelurusan hingga 0,82 mm dengan *soft foot* mencapai 0,65 mm, sedangkan setelah *alignment* deviasi turun menjadi $\leq 0,143$ mm. Pada kondisi *misalignment* amplitudo getaran meningkat signifikan terutama pada arah radial dengan nilai maksimum 43,54 mm/s, serta temperatur *bearing* mencapai 62,8 °C, sedangkan setelah *alignment* nilai getaran dan temperatur menurun walau belum memenuhi standar ISO 10816/20816-3. Perhitungan torsi efektif yang ditransmisikan pada kondisi *alignment* berkisar antara 26,89–27,47 N.m (efisiensi *belt* 96–98%), sedangkan pada kondisi *misalignment* turun menjadi 24,65–26,04 N.m (efisiensi *belt* 88–93%). Hasil ini menegaskan bahwa *misalignment* tidak hanya meningkatkan getaran dan temperatur, tetapi juga menurunkan torsi yang ditransmisikan, sehingga berdampak pada efisiensi energi dan keandalan sistem.

Kata kunci : Getaran, *Misalignment*, PLTMH, Poros Kopling

ABSTRACT

This study investigates the effect of shaft coupling misalignment on the performance of a pulley–belt transmission system in a Micro Hydro Power Plant (PLTMH) simulator in the number of belts. Experiments were conducted using a three-phase electric motor with a rated power of 2.2 kW, a coupling system, pulley–belt transmission, and an axial flow turbine unit. Data were obtained through shaft alignment measurements using a dial indicator, vibration analysis with a vibration analyzer, component temperature monitoring using infrared thermography, and torque calculation based on power and rotational speed at a 1:2 pulley ratio. The results indicate that misalignment caused coupling runout deviations up to 0.82 mm and soft foot of 0.65 mm, whereas after alignment the deviations decreased to ≤ 0.143 mm. Under misalignment, vibration amplitudes increased significantly, particularly in the radial direction, with a maximum value of 43.54 mm/s, while bearing temperature reached 62.8 °C. After alignment, both vibration and temperature levels decreased, although they still did not fully comply with ISO 10816/20816-3 standards. The calculation of the effective transmitted torque under alignment conditions ranges between 26.89–27.47 N·m (96–98% belt efficiency), whereas under misalignment it decreases to 24.65–26.04 N·m (88–93% belt efficiency). These results confirm that misalignment not only increases vibration and temperature but also reduces the transmitted torque, thereby affecting energy efficiency and system reliability.

Keywords : *Vibration, Misalignment, PLTMH, Coupling Shaft*

PENDAHULUAN

Misalignment poros pada *rotating equipment* adalah masalah kritis yang dapat secara signifikan meningkatkan tingkat getaran, mengurangi kinerja mesin, dan memperpendek umur peralatan. Dalam simulator Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH), kelurusan poros kopling terutama pada sistem transmisi puli dan sabuk memainkan peran penting dalam memastikan transmisi daya yang efisien dan keandalan operasional. Ketidaksejajaran, baik angular, paralel, atau kombinasi, mengakibatkan gaya dinamis tambahan yang bermanifestasi sebagai peningkatan getaran, yang menyebabkan percepatan keausan, biaya perawatan yang lebih tinggi, dan potensi kegagalan sistem (Widodo et al., 2021).

Analisis getaran telah menjadi alat diagnostik standar untuk mendeteksi ketidaksejajaran dan menilai dampaknya pada kesehatan mesin. Studi telah menunjukkan bahwa bahkan ketidaksejajaran kecil dapat menyebabkan peningkatan substansial dalam amplitudo getaran, yang berkorelasi dengan peningkatan tekanan mekanis dan pengurangan umur komponen (Widodo et al., 2021). Hubungan antara ketidaksejajaran dan getaran semakin diperumit oleh variasi jumlah belt yang akan berpengaruh pada daya dan torsi

yang ditransmisikan, karena beban yang lebih tinggi dapat memperkuat efek merugikan dari ketidaksejajaran pada dinamika sistem. Memahami interaksi ini sangat penting untuk mengoptimalkan strategi pemeliharaan dan meningkatkan keandalan sistem PLTMH (Umbrajaak et al., 2020).

Studi terkait analisa getaran mesin akibat *misalignment* telah banyak dilakukan, Widodo menganalisis getaran akibat ketidakselarasan pada kopling pompa sentrifugal, menemukan bahwa peningkatan ketidakselarasan secara langsung meningkatkan tingkat getaran dan dapat mengurangi umur mesin (Widodo et al., 2021). Hu, mengembangkan model dinamik nonlinier untuk roda gigi lurus, yang menunjukkan bahwa ketidakselarasan poros secara signifikan meningkatkan getaran sistem dan eksitasi internal (Hu et al., 2023). Villalba melakukan studi terkait penyimpangan gabungan dalam sistem transmisi roda gigi pacu secara signifikan memengaruhi pengukuran getaran, memengaruhi area kontak antara gigi dan rasio kontak (Villalba et al., 2024). Abouelanouar melakukan analisa ketidaksejajaran poros secara signifikan dapat meningkatkan konsumsi energi pada mesin yang berputar, dan analisis getaran adalah alat yang efektif untuk deteksi dini dan pemantauan konsumsi energi

listrik (Abouelanouar et al., 2020). Rahinj juga menganalisa ketidaksejajaran poros yang dapat menyebabkan getaran berlebihan, kebisingan, serta kegagalan bantalan. Hal ini diidentifikasi melalui analisis getaran dan pemeliharaan prediktif (Rahinj, 2019).

Meskipun penelitian terkait ketidaksejajaran poros mesin dan sistem transmisi telah banyak dilakukan, kajian khusus mengenai mekanisme *pulley* dan *belt* pada simulator PLTMH masih sangat terbatas. Secara khusus, investigasi eksperimental terhadap *misalignment* poros kopling terhadap getaran yang ditimbulkan serta besarnya torsi yang ditransmisikan poros dengan variasi jumlah *belt* belum banyak dikembangkan. Selain itu, sebagian besar penelitian sebelumnya lebih mengandalkan pendekatan numerik atau simulasi dengan validasi eksperimental yang minim. Kesenjangan ini menunjukkan perlunya penelitian eksperimental yang lebih komprehensif untuk mengkaji sistem transmisi dengan variasi jumlah *belt* pada kondisi poros *misalignment*.

Untuk itu penulis menawarkan keunikan dengan mengkaji secara eksperimental pengaruh *misalignment* poros kopling dengan variasi jumlah *belt* yang digunakan pada sistem *pulley* dan *belt* simulator PLTMH, serta mengaitkannya dengan besarnya getaran yang terjadi dan torsi yang ditransmisikan poros. Hasil penelitian diharapkan memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan strategi pemeliharaan prediktif dan peningkatan keandalan sistem transmisi.

METODE PENELITIAN

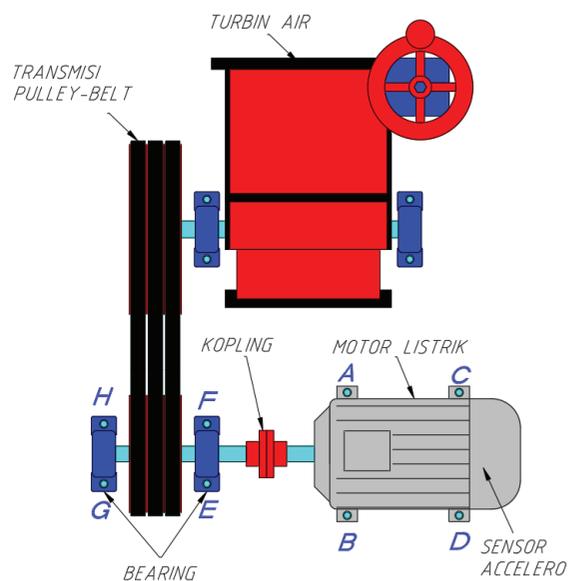
A. Peralatan Eksperimen

Peralatan yang digunakan dalam percobaan ini diantaranya adalah Unit Simulator PLTMH yang terdiri dari motor listrik 3 fasa dengan merk Siement dengan daya 2,2 kw dan putaran 1425 rpm, pemindah transmisi kopling, pemindah transmisi *Pulley-belt* dan unit turbin air *axial flow*. Dial Indikator merk Mitutoyo dengan ketelitian 0,01mm, buatan Jepang. Feeler gauge merk Mitutoyo, Jepang. Vibration analyzer Merk Fluke 810 dan Infrared (IR) Thermography Merk FLIR seri E49001 dibuat di Estonia.

B. Pengukuran Kelurusan Poros

Pengukuran kelurusan poros dilakukan dengan menggunakan dial indikator bertujuan untuk mengetahui ketidaksejajaran poros kopling antara motor listrik dengan *pulley* penggerak. Pengukuran kelurusan poros dimulai dengan pengecekan *soft foot* pada motor listrik dan kedua *bearing* penyangga poros spindel *pulley* penggerak. Selanjutnya dilakukan pengukuran kelurusan pada poros kopling dengan mengikat batang magnet pada poros yang digerakan dan ujung dial menempel pada kopling penggerak. Pengukuran dilakukan pada 3 posisi yaitu pada jam 12, jam 9 dan jam 3, masing-masing posisi diukur sebanyak minimal 3 kali pengukuran.

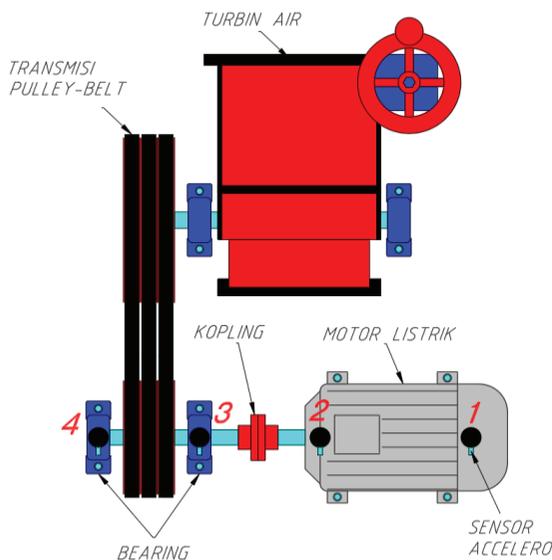
Hasil pengukuran tersebut selanjutnya dianalisis untuk mengidentifikasi adanya penyimpangan atau *misalignment* yang berpotensi menimbulkan getaran berlebih, menurunkan efisiensi transmisi daya, serta mempercepat keausan pada bantalan dan kopling. Dengan demikian, data yang diperoleh dari metode ini menjadi dasar dalam evaluasi kondisi sistem transmisi dan upaya perbaikan yang diperlukan. Titik pengukuran *soft foot* ditunjukan dengan huruf (A,B,C,D, E, F dan G). Sebagaimana Gambar 1. berikut ini.



Gambar 1. Ilustrasi Posisi Pengukuran Kelurusan Poros

C. Prosedur Pengambilan Data Vibrasi

Pengambilan data vibrasi dilakukan dengan menggunakan alat vibration analyzer Fluke 810. Pengukuran getaran dilakukan pada 4 (empat) titik, diantaranya 2 (dua) titik pada motor listrik dan 2 (dua) titik pada bearing poros pulley penggerak. Untuk lebih jelasnya titik pengukuran getaran dapat dilihat pada Gambar 2. berikut.



Gambar 2. Ilustrasi Posisi Pengukuran Getaran

Pengukuran getaran akan diambil pada kondisi poros kopling *Misalignment* dan pada kondisi *alignment* dengan variasi pemasangan jumlah belt (1, 2 dan 3 buah). Hasil pengukuran getaran dianalisa untuk mengetahui sampai sejauhmana PLTMH masih dapat beroperasi dengan kondisi yang ada.

D. Pengukuran Temperatur Komponen Unit PLTMH

Pengukuran temperatur komponen utama unit PLTMH menggunakan alat Infrared (IR) Thermography untuk mengetahui temperatur komponen unit PLTMH dengan memunculkan citra gambar sesuai dengan perbedaan temperatur. Pengukuran dilakukan pada saat kondisi poros kopling *misalignment* dan pada kondisi *alignment*. Hal ini agar diketahui citra temperatur komponen saat poros kopling *misalignment* dan *alignment*. Sehingga gambar hasil pengukuran Infrared (IR) Thermography dapat memperkuat data

hasil pengukuran getaran. Dimana komponen yang mengalami getaran cukup besar akibat ketidaksejajaran poros kopling pada unit simulator PLTMH dapat teridentifikasi berdasarkan citra gambar yang dihasilkan.

E. Perhitungan Torsi yang Dipindahkan

Besarnya torsi yang dipindahkan dari pulley penggerak ke pulley yang digerakan pada kondisi *misalignment* dan kondisi *alignment* dengan variasi jumlah belt dihitung dengan persamaan (1) sebagai berikut (Garshelis, 2002).

$$T = \frac{P \times 60}{2 \pi \times N} \eta \quad (\text{N.m}) \quad (1)$$

Dimana secara berturut-turut T, P, N dan η , masing-masing adalah torsi dalam (N.m), daya dalam (watt), putaran dalam (RPM) dan efisiensi transmisi belt.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengukuran Kelurusan Poros

Pengukuran kelurusan dilakukan pada kondisi *misalignment* dan kondisi *alignment*. Pada kondisi *misalignment* pengukuran kelurusan poros diawali dengan pengukuran *soft foot*. Titik pengukuran *soft foot* motor listrik dan bearing pendukung spindel poros pulley penggerak diperlihatkan sebagaimana Gambar 1. Hasil pengukuran *soft foot* pada kondisi *Misalignment* ditunjukkan pada Tabel 1. berikut.

Tabel 1. Hasil Pengukuran *Soft Foot* pada Kondisi *Misalignment*

Titik Pengukuran	Posisi		Rata-Rata
	1 (mm)	2 (mm)	
A	0	0,45	0,225
B	0,55	0,75	0,65
C	0,23	0,47	0,35
D	0	- 0,20	-0,1
E	0	0,35	0,175
F	0,52	0,05	0,285
G	0,42	0,29	0,39
H	0,56	0,01	0,285

Selanjutnya dilakukan pengukuran kelurusan poros kopling. Hasil pengukuran kelurusan poros kopling pada kondisi *misalignment* ditunjukkan sebagaimana Tabel 2. Sebagai berikut.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Kelurusan Kopling pada Kondisi *Misalignment*

Perco- baan	Posisi Pengukuran dengan Diputar Se- suai Arah Jarum Jam (mm)					
	Arah Jam 12		Arah Jam 9		Arah Jam 3	
	Rim	Face	Rim	Face	Rim	Face
1	0	0	-0,90	-0,40	0,78	0,33
2	0	0	-0,90	-0,39	0,84	0,27
3	0	0	-0,90	-0,34	0,83	0,29
Ra- ta-rata	0	0	-0,90	-0,38	0,82	0,297

Dari hasil pengukuran Tabel 1. dan Tabel 2. dilakukan perbaikan terhadap kelurusan poros mulai dari *soft foot* dan kelurusan poros kopling. Hasil pengukuran *soft foot* setelah dilakukan perbaikan diperlihatkan sebagaimana Tabel 3. Sebagai berikut

Tabel 3. Hasil Pengukuran *Soft Foot* pada Kondisi *Alignment*

Titik Pengukuran	Posisi		Rata-Rata
	1 (mm)	2 (mm)	
A	0,05	0,03	0,04
B	0,04	0,06	0,05
C	0	0	0
D	0,04	0,04	0,04
E	0	0	0
F	0,07	0,05	0,06
G	0	0	0
H	0,03	0,01	0,02

Sedangkan hasil pengukuran kelurusan poros kopling setelah dilakukan perbaikan ditunjukkan sebagaimana Tabel 4. berikut.

Tabel 4. Hasil Pengukuran Kelurusan Kopling pada Kondisi *Alignment*

Per- co- baan	Posisi Pengukuran dengan Diputar Sesu- ai Arah Jarum Jam (mm)					
	Arah Jam 12		Arah Jam 9		Arah Jam 3	
	Rim	Face	Rim	Face	Rim	Face
1	0	0	0	-0,15	0,05	0,10
2	0	0	0	-0,13	0,03	0,18
3	0	0	0	-0,09	0,02	0,15
Ra- ta-rata	0	0	0	-0,123	0,033	0,143

Pengukuran *soft foot* (Tabel 1.) dan kelurusan kopling (Tabel 2.) pada kondisi *misalignment* menunjukkan nilai rata-rata ketidakrataan kaki (*soft foot*) hingga sekitar 0,65 mm (titik B) dan deviasi kopling rim hingga 0,82 mm (arah jam 3), yang merupakan indikasi kesalahan pemasangan awal yang signifikan.

Setelah dilakukan koreksi (penyusunan shim dan penyetaraan poros), nilai rata-rata *soft foot* (Tabel 3) menurun drastis menjadi di bawah 0,06 mm, dan deviasi kopling (Tabel 4.) pada rim/face hanya sekitar 0,033 mm – 0,143 mm. Penurunan ini mencerminkan efektivitas koreksi *alignment* dan perataan kaki mesin dalam mengurangi beban reaktif dan ketidakpastian struktural.

Fenomena ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa *misalignment* dapat mengurangi ketebalan film pelumasan minimum dan meningkatkan tekanan serta suhu lokal pada bantalan, serta bahwa kondisi *soft foot* yang tidak diperbaiki dapat menyebabkan perubahan *alignment* selama pengencangan baut dan getaran tak konsisten (Li et al., 2022).

Dalam praktik industri, toleransi *misalignment* sering ditetapkan berdasarkan kecepatan (RPM) dan karakteristik kopling (Pruftechnik), sehingga batas kopling nominal bukanlah jaminan bahwa nilai tersebut aman untuk sistem secara keseluruhan (Ludeca, 2002).

Dengan mengacu pada referensi tersebut, data hasil pengukuran pada kondisi *alignment* yang diperoleh ($offset \leq 0,143$ mm dan $soft\ foot \leq 0,06$ mm) masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima, sehingga kondisi poros setelah perbaikan dapat dinyatakan layak secara operasional.

B. Hasil Pengukuran Data Vibrasi

Pengukuran data vibrasi diukur pada kondisi poros *misalignment* dan pada kondisi *alignment* dengan variasi jumlah *belt* (1,2 dan 3 buah). Hasil pengukuran data vibrasi simulator PLTMH pada kondisi *misalignment* ditunjukkan sebagaimana Tabel 5. Selanjutnya dilakukan perbaikan terhadap *misalignment* kopling yang menghubungkan motor listrik dengan spindel *pulley* penggerak. Dimana hasil pengukuran data vibrasi pada kondisi *alignment* ditunjukkan sebagaimana Tabel 6.

Sedangkan apabila dilihat dari tren munculnya getaran maksimal yang terjadi pada setiap titik

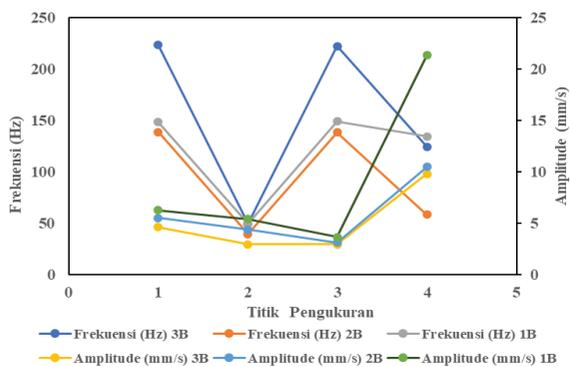
pengukuran dan dikaitkan dengan frekuensi kondisi *alignment*, maka trennya dapat dilihat yang terjadi baik pada kondisi *misalignment* dan pada Gambar 3. dan Gambar 4. sebagai berikut

Tabel 5. Hasil Pengukuran Vibrasi pada Kondisi *Misalignment*

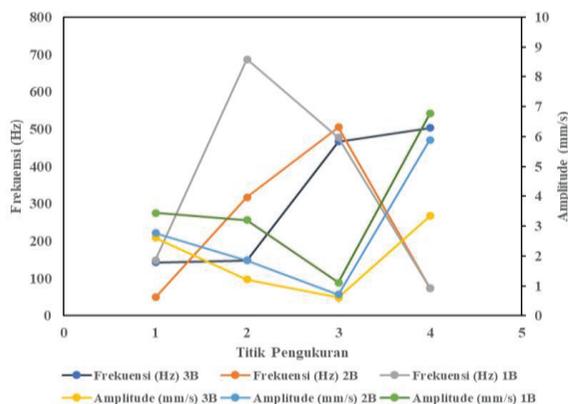
Variasi Belt	3 Belt			2 Belt			1 Belt		
	Overall Vibration (mm/s)								
Titik Pengukuran	A	R	T	A	R	T	A	R	T
Motor 1	24,49	28,72	24,28	36,25	19,24	20,42	29,85	18,61	24,46
Motor 2	18,13	17,51	20,67	18,82	20,36	19,63	21,47	19,14	16,34
Bearing 3	30,58	25,34	21,16	18,93	43,54	12,55	30,60	27,33	20,35
Bearing 4	34,77	33,68	25,33	36,10	34,09	28,59	34,56	33,86	25,48

Tabel 6. Hasil Pengukuran Vibrasi pada Kondisi *Alignment*

Variasi Belt	3 Belt			2 Belt			1 Belt		
	Overall Vibration (mm/s)								
Titik Pengukuran	A	R	T	A	R	T	A	R	T
Motor 1	26,38	13,60	21,26	25,13	16,00	16,85	24,74	19,41	20,17
Motor 2	14,87	15,45	19,49	12,04	15,96	20,23	16,70	15,11	17,25
Bearing 3	21,16	22,05	17,22	20,99	22,57	18,68	22,44	22,89	15,59
Bearing 4	18,30	26,87	0,10	17,91	29,47	22,23	19,41	30,03	17,57



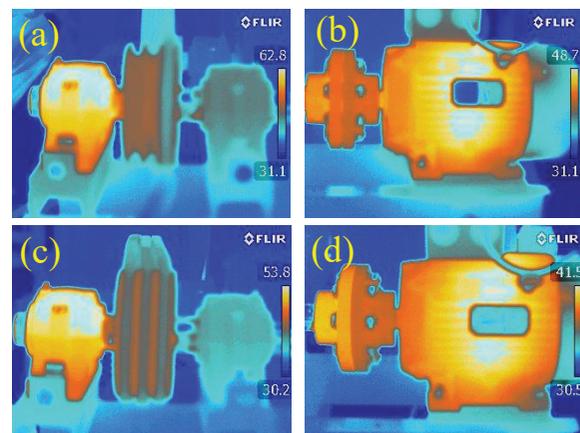
Gambar 3. Tren Getaran pada kondisi *Misalignment*



Gambar 4. Tren Getaran pada kondisi *Alignment*

C. Hasil Pengukuran Temperatur Komponen Unit PLTMH

Pengukuran temperatur komponen menggunakan alat Infrared (IR) Thermography dilakukan pada kondisi *misalignment* dan kondisi *alignment*. Pengukuran difokuskan pada komponen motor listrik dan dua *bearing* yang menumpu spindel poros *pulley* penggerak. Hasil pengukuran temperatur komponen PLTMH sebagaimana Gambar 5. berikut.



Gambar 5. Hasil Pengukuran Thermal Imager (a,b) *Bearing* dan Motor pada kondisi *Misalignment* (c,d) *Bearing* dan Motor pada Kondisi *Alignment*

D. Hasil Perhitungan Torsi

Perhitungan torsi yang dipindahkan dari *pulley* penggerak ke *pulley* yang digerakan dengan daya yang dihasilkan dari motor listrik sebesar 2,2 kw. Pada putaran 1500 RPM. Dengan perbandingan dimensi *pulley* penggerak dan *pulley* yang digerakan sebesar 1:2, dihitung dengan menggunakan persamaan (1). Perhitungan torsi dilakukan baik pada kondisi poros kopling *Misalignment* dan *alignment* serta dengan variasi jumlah *belt* (1, 2 dan 3 *belt*), sehingga diperoleh hasil perhitungan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 7. berikut.

Tabel 7. Hasil Perhitungan Torsi yang Dipindahkan

Kondisi	#Belt	Ef (η)	P _{terkirim} (Watt)	T _{driven} (N.m)
<i>Misalignment</i>	1	0,88	1936	24,65
<i>Misalignment</i>	2	0,91	2002	25,49
<i>Misalignment</i>	3	0,93	2046	26,04
<i>Alignment</i>	1	0,96	2112	26,89
<i>Alignment</i>	2	0,97	2134	27,18
<i>Alignment</i>	3	0,98	2156	27,47

E. Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental *misalignment* poros kopling pada unit PLTMH dengan variasi jumlah *belt* terhadap getaran yang terjadi dan torsi yang ditransmisikan, diperoleh bahwa hasil pengukuran getaran pada kondisi *misalignment* (Tabel 5). Terlihat bahwa jumlah *belt* berpengaruh nyata terhadap level getaran. Dimana semakin sedikit *belt* yang terpasang maka semakin besar getaran keseluruhan yang terjadi. Hal ini karena sistem dengan banyak *belt* dapat menahan beban dan *misalignment* lebih baik melalui distribusi beban dan sedikit tambahan kekakuan.

Dampak terbesar akibat getaran yang ditimbulkan diterima oleh komponen *bearing* terutama arah radial sampai menyetuh nilai (43,54 mm/s) maupun arah tangensial mencapai (28,59 mm/s), karena efek *misalignment* dan beban tidak merata lebih terasa pada bantalan. Meskipun sistem 3 *belt* menawarkan getaran paling rendah, tetap ada getaran yang ditimbulkan oleh *misalignment* yang perlu diperbaiki.

Dalam kondisi *alignment* poros, data pada Tabel 6. menunjukkan adanya penurunan nilai getaran keseluruhan dibanding kondisi *misalignment*,

namun amplitudo getaran yang diukur masih relatif tinggi, terutama pada arah radial dan tangensial di titik motor maupun *bearing* dengan nilai yang mencapai >20 mm/s. Jika dibandingkan dengan standar ISO 10816/20816-3, batasan getaran keseluruhan (vibration velocity RMS) untuk mesin listrik berukuran sedang dengan shaft height 160–315 mm umumnya berkisar antara 2,8–4,5 mm/s untuk kategori operasi yang masih aman (zone B) (Rion, 1941).

Nilai pengukuran dalam penelitian ini jelas melebihi ambang tersebut, sehingga secara standar internasional getaran yang diperoleh belum dapat dikategorikan aman. Hasil ini sejalan dengan temuan (Yanto et al., 2020) yang menyatakan bahwa *misalignment* maupun tegangan *belt* yang tidak tepat dapat meningkatkan getaran sistem secara signifikan, meskipun setelah dilakukan perbaikan *alignment* tren getaran memang menurun.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa meskipun upaya *alignment* sudah menurunkan tingkat getaran, nilai yang diperoleh masih jauh di atas standar ISO sehingga masih diperlukan langkah korektif tambahan seperti penyesuaian tegangan *belt*, pengecekan kondisi *bearing*, maupun peningkatan kekakuan struktur untuk memastikan keandalan sistem transmisi.

Hasil pengukuran tren getaran pada Gambar 3. dan Gambar 4. menunjukkan perbedaan karakteristik signifikan antara kondisi *misalignment* dan *alignment*. Pada kondisi *misalignment*, amplitudo getaran maksimum mencapai sekitar 22 mm/s dengan frekuensi dominan berkisar antara 150–200 Hz, sedangkan pada kondisi *alignment* amplitudo getaran tertinggi menurun hingga kisaran 6–7 mm/s dengan frekuensi dominan di bawah 400 Hz. Peningkatan amplitudo pada kondisi *misalignment* mengindikasikan adanya gaya dinamis tambahan akibat ketidaksejajaran poros yang menyebabkan ketidakseimbangan distribusi beban pada *bearing* dan *pulley*. Fenomena ini memperkuat adanya hubungan linier antara ketidaksejajaran mekanis terhadap peningkatan energi *vibrasi* sistem.

Berdasarkan tren grafik amplitudo dan frekuensi pada kedua kondisi pengujian, Titik *Bearing* 4 berisiko tinggi untuk terjadi kerusakan, hal ini terlihat dari lonjakan amplitude, sehingga

menjadi kandidat utama untuk perbaikan prioritas.

Sebaliknya, titik bearing 3 atau titik Pengukuran 3, memperlihatkan amplitudo relatif rendah dapat dikategorikan sebagai cukup aman dalam jangka pendek, artinya tidak langsung menghadapi kerusakan kritis akibat *vibrasi* saat ini, namun tetap perlu pemantauan berkala.

Hasil ini konsisten dengan penelitian yang dilakukan oleh Albbery dan Szabo, yang menyatakan bahwa shaft misalignment menyebabkan peningkatan signifikan pada amplitudo getaran serta perubahan spektrum frekuensi akibat gaya radial yang tidak seimbang pada rolling element bearing (Albbery & Szabo, 2021). Sementara itu, penelitian oleh Yanto dkk. menemukan bahwa sistem transmisi pulley-belt dengan kondisi misalignment menunjukkan pola getaran dominan pada frekuensi menengah (100–200 Hz), serupa dengan hasil yang diperoleh pada penelitian ini, di mana puncak frekuensi terbesar muncul pada titik pengukuran ketiga yang merupakan posisi bearing penggerak (Yanto et al., 2020).

Dengan demikian, hasil grafik menunjukkan bahwa perbaikan *alignment* pada sistem simulator PLTMH mampu menurunkan amplitudo getaran lebih dari 60%, sekaligus menstabilkan spektrum frekuensi operasi. Penurunan ini mengindikasikan peningkatan keseimbangan dinamis dan efisiensi transmisi daya.

Selanjutnya dari hasil pengukuran temperatur dengan menggunakan Infrared Thermografi pada Gambar 5. memperlihatkan adanya perbedaan signifikan antara kondisi *misalignment* (Gambar 5a dan 5b) dengan kondisi *alignment* (Gambar 5c dan d). Pada kondisi *misalignment*, temperatur maksimum komponen, khususnya pada *bearing*, mencapai 62,8 °C, sedangkan pada kondisi *alignment* nilai temperatur turun hingga sekitar 53,8 °C pada *bearing* dan 41,5 °C pada motor.

Peningkatan temperatur ini berkorelasi langsung dengan kondisi ketidakselarasan poros yang menyebabkan gaya radial dan aksial tambahan pada bantalan serta peningkatan gesekan pada komponen transmisi. Kondisi tersebut memicu kenaikan vibrasi, sebagaimana terlihat pada data pengukuran getaran yang menunjukkan amplitudo lebih tinggi pada kondisi *misalignment* (Tabel 5.) dibanding pada kondisi *alignment* (Tabel 6).

Hal ini juga sejalan dengan data tren munculnya getaran maksimal yang terjadi pada setiap titik (Gambar 3 dan Gambar 4). Dimana pada titik 3 (bearing 3) terlihat dari hasil citra temperatur Infrared (IR) Thermografi menunjukkan warna yang mengindikasikan temperatur pada komponen tersebut lebih rendah. Sedangkan pada titik 4 (bearing 4) menunjukkan citra gambar warna yang mengindikasikan komponen tersebut memiliki temperature yang cukup tinggi.

Hasil ini konsisten dengan penelitian Albbery dan Szabo (Albbery & Szabo, 2021) yang melaporkan bahwa misalignment *bearing* berpengaruh signifikan terhadap peningkatan temperatur akibat bertambahnya gaya gesek pada kontak elemen gelinding. Penelitian (Yanto et al., 2020) juga menunjukkan bahwa *misalignment* pada sistem *pulley-belt* meningkatkan getaran dengan karakteristik amplitudo yang lebih besar pada arah radial dan aksial, serupa dengan fenomena yang ditemukan pada penelitian ini.

Selain itu, studi dari (Li et al., 2022) menegaskan bahwa *misalignment* poros dapat menimbulkan interaksi dinamis antara *unbalance* dan gaya tambahan pada sistem rotasi, sehingga memperbesar respons getaran sekaligus berdampak pada kenaikan temperatur komponen. Dengan demikian, perbaikan *alignment* tidak hanya menurunkan tingkat getaran, tetapi juga berpengaruh langsung terhadap kestabilan termal komponen, sehingga menjaga keandalan sistem simulator PLTMH.

Sedangkan hasil analisis perhitungan torsi (Tabel 7.) menunjukkan bahwa pada kondisi *alignment*, nilai torsi yang ditransmisikan mencapai 26,89–27,47 N.m dengan efisiensi transmisi *belt* 96–98%, sedangkan pada kondisi *misalignment* terjadi penurunan torsi menjadi 24,65–26,04 N.m dengan efisiensi transmisi *belt* 88–93%. Hal ini menegaskan bahwa *misalignment* memberikan kontribusi signifikan terhadap meningkatnya rugi-rugi transmisi, baik akibat slip maupun distribusi beban yang tidak merata pada *belt*.

Variasi jumlah belt terbukti mempengaruhi besarnya nilai efisiensi transmisi sehingga mempengaruhi besarnya daya dan torsi yang ditransmisikan. Semakin banyak jumlah belt yang terpasang maka semakin besar nilai efisiensi transmisi, daya dan torsi yang ditransmisikan.

Efisiensi transmisi *belt* yang terukur dalam penelitian ini masih sejalan dengan literatur teknis yang menyatakan bahwa *V-belt* atau *poly-V belt* umumnya memiliki efisiensi 95–98% pada kondisi pemasangan yang tepat dan dapat menurun drastis hingga 85–90% akibat slip atau ketidakselarasan poros (Chen et al., 1998); (Silva et al., 2018); (Krawiec et al., 2022).

Distribusi beban *belt* juga memengaruhi nilai torsi per-*belt*. Pada konfigurasi satu *belt*, beban torsi per-*belt* relatif tinggi (26,89 N.m pada *alignment* dan 24,65 N.m pada *misalignment*), sehingga risiko slip dan keausan meningkat. Penambahan jumlah *belt* menjadi dua atau tiga mampu menurunkan beban per-*belt* menjadi sekitar 13,45 N.m dan 8,96 N.m pada *alignment*, atau 12,33 N.m dan 8,22 N.m pada *misalignment*. Kondisi ini sejalan dengan temuan Dereyne yang melaporkan bahwa peningkatan jumlah *belt* meningkatkan efisiensi global sistem melalui distribusi beban dan mengurangi rugi slip (Dereyne, 2015).

Penelitian oleh Maščenik & Murčínková juga menunjukkan bahwa slip *belt* berbanding lurus dengan beban yang dipikul per-*belt*, sehingga penggunaan multi-*belt* dapat meningkatkan kestabilan transmisi dan memperpanjang umur pakai (Mascenik & Murcinkova, 2019).

Dari sisi keandalan sistem, meskipun nilai efisiensi pada kondisi *misalignment* masih mendekati 90%, torsi yang ditransmisikan tetap lebih rendah dibandingkan kondisi *alignment*. Hal ini karena ketidaksejajaran poros meningkatkan gaya radial dan gesekan, sehingga memperbesar rugi energi baik dalam bentuk panas maupun penurunan daya transmisi. Dengan demikian, untuk menjaga kinerja optimum sistem transmisi *pulley-belt* pada simulator PLTMH, upaya *alignment* yang baik menjadi faktor krusial, disertai dengan pemilihan jumlah *belt* yang sesuai agar beban torsi per-*belt* tetap berada pada batas aman.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa *misalignment* poros pada simulator PLTMH berdampak signifikan terhadap performa sistem transmisi *pulley-belt*. Deviasi kelurusan yang terukur pada kondisi *misalignment* mencapai *soft*

foot 0,65 mm dan deviasi rim 0,82 mm, namun setelah dilakukan *alignment* nilai deviasi menurun hingga $\leq 0,143$ mm dan masih berada dalam batas toleransi operasional. Kondisi *misalignment* terbukti meningkatkan amplitudo getaran, terutama pada arah radial dan tangensial dengan nilai puncak hingga 43,54 mm/s, serta meningkatkan temperatur komponen *bearing* hingga 62,8 °C. Setelah perbaikan *alignment*, nilai getaran dan temperatur berkurang, meskipun masih melebihi standar ISO 10816/20816-3.

Selain itu, variasi jumlah *belt* terbukti berpengaruh langsung terhadap besar kecilnya getaran yang timbul. Semakin banyak jumlah *belt* yang digunakan, amplitudo getaran cenderung menurun karena beban daya dapat terdistribusi lebih merata pada masing-masing *belt*, sehingga gaya tangensial dan gaya lateral yang menimbulkan getaran menjadi lebih kecil. Konfigurasi tiga *belt* menghasilkan getaran paling rendah dan efisiensi transmisi tertinggi dibandingkan satu atau dua *belt*.

Hasil perhitungan torsi pada rasio *pulley* 1:2 menunjukkan bahwa pada kondisi *alignment* berkisar antara 26,89–27,47 N.m (efisiensi transmisi *belt* 96–98%), sedangkan pada kondisi *misalignment* mengalami penurunan menjadi 24,65–26,04 N.m (efisiensi *belt* 88–93%). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa *misalignment* tidak hanya meningkatkan getaran dan temperatur, tetapi juga menurunkan torsi yang ditransmisikan sehingga mengurangi efisiensi energi dan keandalan sistem. Perbaikan *alignment* mampu menekan dampak negatif tersebut, namun tindakan tambahan seperti penyesuaian tegangan *belt*, pemeriksaan kondisi *bearing*, dan peningkatan kekakuan struktur masih diperlukan untuk mencapai kondisi operasi yang lebih stabil dan andal.

DAFTAR PUSTAKA

- Abouelanouar, B., Elkihel, A., & Gziri, H. (2020). Experimental study on energy consumption in rotating machinery caused by misalignment. *SN Applied Sciences*, 2. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3043-2>
- Albdery, M. H., & Szabo, I. (2021). Experimental

- Study of the Effect of Misalignment on Rolling Element Bearing. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 6(7), 87–90. <https://doi.org/10.24018/ejeng.2021.6.7.2661>
- Chen, T. F., Lee, D. W., & Sung, C. K. (1998). An experimental study on transmission efficiency of a rubber V-belt CVT. *Mechanism and Machine Theory*, 33(4), 351–363. [https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(97\)00049-9](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(97)00049-9)
- Dereyne, S. (2015). An efficiency measurement campaign on belt drives. *Energy Efficiency in Motor Driven Systems, Proceedings*, 11. <https://core.ac.uk/download/pdf/55693235.pdf>
- Garshelis, I. J. (2002). Torque and power measurement. *The Mechatronics Handbook*, 19-48-19–61. <https://doi.org/10.1201/b15474-49>
- Hu, Y.-H., Du, Q., & Xie, S.-H. (2023). Nonlinear dynamic modeling and analysis of spur gears considering uncertain interval shaft misalignment with multiple degrees of freedom. *Mechanical Systems and Signal Processing*. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110261>
- Krawiec, P., Warguła, Ł., Waluś, K. J., Gawrońska, E., Ságová, Z., & Matijošius, J. (2022). Efficiency and Slippage in Draw Gears with Flat Belts. In *Energies* (Vol. 15, Issue 23). <https://doi.org/10.3390/en15239184>
- Li, Q., Du, Y. J., Wang, Y. J., Zhang, S., Liu, Q. L., Li, B., & Xu, W. W. (2022). Analysis on the Performances of Misaligned Journal Bearings using Full-Scale Test Rig and Conjugate Heat Transfer Method. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 15(3), 747–756. <https://doi.org/10.47176/jafm.15.03.33138>
- Ludeca. (2002). A Practical Guide to Shaft Alignment. *Prüftechnik*, 63. https://www.plantservices.com/assets/knowledge_centers/ludeca/assets/A_Practical_Guide_to_Shaft_Alignment.pdf
- Mascenik, J., & Murcinkova, Z. (2019). Experimental Determination of the Belt Transmission Slip. *Management Systems in Production Engineering*, 27(4), 205–210. <https://doi.org/10.1515/mspe-2019-0032>
- Rahinj, S. (2019). Vibration Analysis of Misaligned Shafts. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.4512>
- Rion. (1941). *Instruction Manual Vibration Meter VM-63A*. 18(11), 225–226.
- Saputra, A. H., & Wonoyudo, B. D. (2013). Pola Vibrasi Dari Transmisi V-Belt Dibawah Pengaruh Parallel Misalignment. *Jurnal Teknik ITS*, 2(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v2i2.4587>
- Silva, C. A. F., Manin, L., Rinaldi, R. G., Remond, D., Besnier, E., & Andrianoely, M.-A. (2018). Modeling of power losses in poly-V belt transmissions: Hysteresis phenomena (enhanced analysis). *Mechanism and Machine Theory*, 121, 373–397. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.10.008>
- Umbrajkaar, A., Krishnamoorthy, A., & Dhumale, R. (2020). Vibration Analysis of Shaft Misalignment Using Machine Learning Approach under Variable Load Conditions. *Shock and Vibration*, 2020, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2020/1650270>
- Villalba, R. T., Ramírez, H., Estrada, H. Á., López, J. O., González, A. R., Barrera, K. O., Almanza, L. R., & Corrales, D. E. (2024). Effect of Combined Misalignments on Vibrations of a Single-Stage Spur Gear Transmission System: An Experimental Approach. *IEEE Access*, 12, 50030–50043. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3385371>
- Widodo, I., Khoryanton, A., & Pramono, A. (2021). Analysis of vibration due to misalignment in the clutch cluster installation of centrifugal pump. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1108. <https://doi.org/10.1088/1757->

899X/1108/1/012037
Yanto, A., Anrinal, Saferi, R., & Memori, Z.
(2020). Study of Experimental Vibration
Due to Misalignment of Pulley-Belt in
Rotary Machine. *Jurnal Teknik Mesin*,
10(2), 118–122. [https://doi.org/10.21063/
jtm.2020.v10.i2.118-122](https://doi.org/10.21063/jtm.2020.v10.i2.118-122)

