

## Kebocoran Oli *Engine Turboprop* Akibat Vibrasi dari Ketidakseimbangan Rotor *AC Wild Generator*

Barly Feriandra Prabowo<sup>1\*</sup>, Muhammad Fitri<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Prodi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana,  
Jl. Meruya Selatan No.1, Joglo, Kec. Kembangan, Kota Jakarta Barat, Daerah Khusus Ibukota  
Jakarta

\*Corresponding author: [workbarly@gmail.com](mailto:workbarly@gmail.com)

### Abstract

*Lubricating oil leaks in turboprop aircraft engines can occur due to several reasons such as increased seals caused by vibrations due to imbalance of rotor components. Oil leaks originating from the engine connection with electrical components, namely the AC wild generator, are suspected to occur due to rotor imbalance which causes vibrations. The study was conducted to obtain the value of rotor instability which produces vibrations resulting in oil leakage at the engine connection and the ACW generator shaft and its magnitude against that permitted by the maintenance manual. The method used in this study is a qualitative literature review method by collecting historical leaks, conducting case studies and problem analysis. From the results of the tests and analysis that have been carried out, it can be concluded that there has been an unbalanced over limit on all test materials with an average total unbalanced on plane 1 and plane 2 of 24.33 g.mm (1,440%). This value is 14 times the maximum threshold limit permitted by the maintenance manual, which is 1.69 g.mm. The resulting imbalance allows vibrations to occur on the rotor and causes damage such as settlement or abrasion of the seal, causing leaks. From this test, it can be concluded that the cause of the oil leak is due to the imbalance of the AC wild generator rotor.*

**Keyword:** Generator, unbalanced, Rotor, oil leak, Schenck.

### Abstrak

Kebocoran oli pelumas pada *engine* pesawat *turboprop* dapat terjadi karena beberapa sebab seperti karena deformasi *seal* yang diakibatkan oleh getaran akibat ketidak-seimbangan rotor komponen. Kebocoran oli yang berasal dari sambungan *engine* dengan komponen kelistrikan yaitu *AC wild generator* yang dicurigai terjadi karena ketidak- seimbangan rotor pada yang menyebabkan terjadinya vibrasi. Penelitian dilakukan untuk mendapatkan nilai ketidak seimbangan rotor yang menghasilkan getaran sehingga terjadi kebocoran oli pada sambungan *engine* dan *shaft ACW generator* dan nilai besarnya terhadap yang diijinkan oleh *maintenance manual*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kualitatif *literature review* dengan mengumpulkan historical kebocoran, melakukan studi kasus dan analisis masalah. Dari hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa telah terjadi *unbalanced over limit* pada semua bahan uji dengan rata-rata total *unbalanced* pada *plane 1* dan *plane 2* sebesar 24,33 g.mm (1.440%). Nilai tersebut sebesar 14x batas maksimal ambang batas yang diijinkan oleh *maintenance manual* yaitu 1,69 g.mm. ketidak-seimbangan yang dihasilkan memungkinkan terjadinya getaran pada rotor dan menyebabkan kerusakan seperti deformasi atau abrasi pada *seal* sehingga menyebabkan kebocoran. Dari pengujian tersebut dapat diberikan kesimpulan penyebab kebocoran oli disebabkan oleh ketidak-seimbangan rotor *AC wild generator*.

**Kata kunci:** Vibrasi, *unbalanced*, Rotor, oil leak, Schenck.

## 1. Pendahuluan

Dunia penerbangan semakin hari semakin berkembang seiring dengan kemajuan teknologi dan kebutuhan jasa transportasi udara. Berdasarkan data *ch-aviation* pada tahun 2022 tercatat 28,576 pesawat penumpang di seluruh dunia. Secara garis besar, produsen pesawat terbagi menjadi dua parbikan besar seperti The Boeing Company dan Airbus yang masing-masing memproduksi baik pesawat komersil angkut penumpang, komersil angkut barang

dan juga militer. Airbus juga memiliki anak perusahaan yang memproduksi pesawat regional bermesin *turboprop* berpenumpang 42 orang dan 72 orang [1]. Jenis pesawat permesin *turboprop* yang diproduksi di Perancis dan Italia yang merupakan pesawat dikenal memiliki *cost=effective* [2].

Pada rentang tahun 2017-2023, salah satu maskapai pengguna pesawat angkut penumpang bermesin *turboprop* di Indonesia mengalami kebocoran oli yang bersumber dari sambungan antara *engine*

dan komponen elektrikal yaitu AC *wild* generator. AC generator merupakan kemajuan elektrifikasi dalam system pesawat untuk meningkatkan kebutuhan listrik pada pesawat [3]. Referensi siklus kerja *engine turboprop* dari pesawat bermesin propeller [4]. *Engine turboprop* ini cukup banyak digunakan karena memiliki efisiensi yang cukup baik pada tingkat power tertentu [5]. *Engine* yang dapat memberikan 2.500 maksimum continuous *shaft horsepower* dan menggerakkan 6 bilah baling-baling dengan diameter 3.93m [6]

ACW generator mengkonversi energi mekanik melalui shaft menjadi energi listrik yang terdiri dari 115-200V/400Hz arus bolak-balik 3 phase untuk mensuplai system kelistrikan pesawat. Ketika ACW generator mulai berputar, magnet permanen pada rotor bergerak di depan armature dan menginduksi arus bolak-balik ke dalam belitan dengan frekuensi yang sebanding dengan kecepatan putaran. ACW Generator dihubungkan dengan pengatur tegangan yang mengontrol tegangan keluaran dengan mengatur arus medan dan melindungi sistem elektrikal AC pesawat. Bagian besar komponen generator ini, yaitu: (a) *Permanent magnet generator* (PMG) rotor, (b) *Torque shaft*, (c) *Armature*, (d) *Diode Holder*.

Ketidak seimbangan pada komponen engine pesawat dapat menyebabkan gangguan operasional pada engine. Sistem rotor merupakan badan utama getaran mesin sekaligus eksitasi utama getaran mesin, dan ketidakseimbangan sistem rotor merupakan faktor utama penyebab getaran mesin pesawat terbang [7]. Pengaruh dari ketidak seimbangan rotor engine terhadap hilangnya bilah dari rotor *engine turbofan* yang sedang berjalan akan menimbulkan ketidakseimbangan tiba-tiba pada sistem dinamis, dan akibatnya menyebabkan benturan, asimetri rotor, dan serangkaian karakteristik dinamis [8]. kebocoran oli menyebabkan *engine* mengalami kekurangan tekanan oli, sehingga menyebabkan *engine* harus mengalami perbaikan besar dengan biaya yang tidak murah. Jika *seal* mekanis rusak, sering kali *engine* harus segera dimatikan untuk

menghindari permasalahan *reliability* sehingga menimbulkan biaya tinggi [9]. Pada kasus kebocoran oli melalui *driveshaft*, aliran aktif langsung dipengaruhi oleh topografi permukaan poros dan bibir *seal* [10]. Pada penjelasan di atas dapat dinyatakan bahwa kebocoran minyak pelumas pada *engine* pesawat *turboprop* dapat terjadi disebabkan dalam beberapa hal seperti *unbalanced* pada rotor, pada sambungan antara *engine* dan komponen elektrikal, dan pengaruh topografi permukaan poros dan bibir *seal*. Selain menghasilkan kebisingan yang mengganggu kenyamanan para awak dan penumpang, struktur dan komponen mesin dapat rusak akibat getaran yang terlalu tinggi sehingga mengakibatkan kelelahan material dan perubahan bentuk material [11]. Kebocoran oli pada *engine* dapat mengakibatkan keausan pada komponen *gear* dan *bearing* yang dilumasi serta dapat menyebabkan bagian-bagian yang memerlukan pelumasan tidak mendapat suplai oli dengan baik, sehingga kerja *engine* tidak maksimal dan dapat merusak *engine* secara keseluruhan [12]. Meskipun kebocoran oli merupakan masalah, sulit untuk mempertahankan *seal* yang sempurna pada *shaft* karena kondisi pengoperasian yang kasar [13].

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai ketidakseimbangan rotor AC *wild* generator yang memungkinkan terjadinya getaran sehingga menyebabkan kebocoran oli pada sambungan *engine* dan komponen ACW Generator. Data yang diambil merupakan pengujian saat komponen dilakukan perbaikan dan pengecekan rutin. Pada setiap peralatan berputar (*rotating equipment*) dilakukan pengecekan vibrasi untuk menemukan permasalahan pada peralatan, selain itu dilakukan juga untuk melihat kondisi peralatan pasca perbaikan [14].

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *literature review* dengan diagram fishbone dan eksperimental dengan melakukan pengujian pada komponen ACW generator dengan mengukur ketidak-seimbangannya

pada alat uji *horizontal dynamic balancing Schenk HL2*. Ketidak-seimbangan massa rotor, yang terjadi ketika pusat massa rotor tidak sejajar dengan pusat putaran, merupakan salah satu malfungsi paling umum yang menyebabkan seluruh *engine* bergetar [15]. Jika getaran *engine* akibat ketidak-seimbangan massa melebihi batas alarm, maka dapat mengakibatkan kegagalan *engine*. Oleh karena itu, *engine* yang berputar harus diperiksa secara teratur untuk memastikan keseimbangannya benar, yaitu [16]:

$$U = m \times r$$

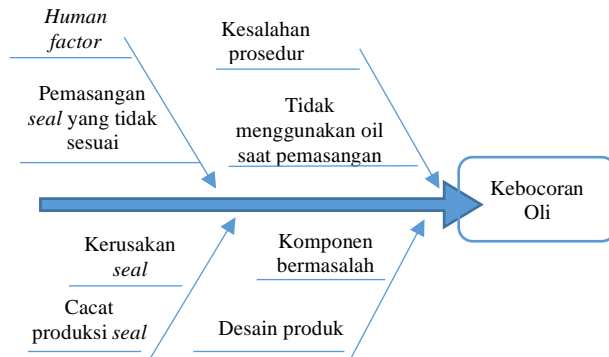
Keterangan:

$U = Unbalanced$  (g.mm)

$m =$  masa (g)

$r =$  jarak dari titik *unbalanced* ke pusat benda (mm)

Pada permasalahan kebocoran oli ini telah dilakukan review dengan menggunakan *fishbone diagram* pada gambar 1.



Gambar 1. *Fishbone Diagram* Kebocoran Oli

*Fishbone diagram* digunakan untuk melakukan analisis *cause and effect* untuk menyelesaikan permasalahan kebocoran, adapun berikut penjabarannya, yaitu diantaranya:

### 1. Identifikasi *seal*

Identifikasi *seal* dilakukan karena terdapat 2 tipe *seal* yang berbeda yang dipasang pada ACW generator. Yang pertama adalah *shipping seal* yang berfungsi untuk melindungi poros *shaft* ACW generator saat proses pengiriman komponen

dari *workshop* ke proses pemasangan di *engine*. yang kedua adalah *shaft dynamic oil seal* yang diperuntukkan untuk operasional komponen saat setelah dipasang di *engine*.

### 2. Identifikasi referensi pengerjaan

Pada tahap ini dilakukan evaluasi terhadap referensi pengerjaan pemasangan ACW generator apakah memiliki prosedur yang tidak sesuai.

### 3. Identifikasi seal batch number saat dilakukan pembelian

Identifikasi *seal* melalui batch number juga diperlukan untuk mengklasifikasi apakah *seal* yang rusak berasal dari batch pembelian yang sama. Namun, setelah dilakukan penggantian secara menyeluruh dengan *batch* yang berbeda, tetap ditemukan terjadi kebocoran.

### 4. Terjadi ketidak-seimbangan pada komponen

Perlu dilakukan pengujian terhadap sample generator menggunakan *horizontal dynamic balancing* untuk mendapat angka ketidak-seimbangan.

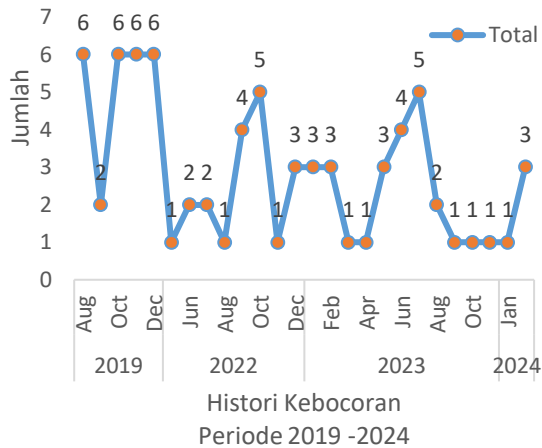
## 3. Hasil dan Pembahasan

### a. Histori Data Kebocoran

Data yang terkumpul merupakan historikal kebocoran oli *engine turboprop* pada sambungan komponen ACW generator. Dalam proses terjadinya kebocoran oli pada *engine* ini, telah dilakukan beberapa *technical review* untuk menghilangkan kebocoran oli namun masih selalu muncul setiap tahunnya. Pada gambar 2 ditunjukkan bahwa rata-rata terdapat 2 kejadian kebocoran oli perbulan dan 23 kejadian pertahun.

Tabel 1. Data kebocoran 2019-2023

Tahun	Kejadian Pertahun	Rata-rata perbulan
2019	26	2,17
2022	19	1,58
2023	25	2,08



Gambar 2. Data kebocoran 2019-2024

Pada tabel 2 ditunjukkan sebaran usia/waktu (dalam hitungan jam) *seal* yang rusak setelah dipasang pada komponen ACW generator dan kemudian terjadi kebocoran seperti pada pesawat 1 524 jam, pesawat 2 433 jam, pesawat 2 715 jam dan seterusnya. Rata-rata kebocoran terjadi pada 560 jam setelah *seal* terpasang pada ACW generator.

Tabel 2. Waktu Terjadi kebocoran

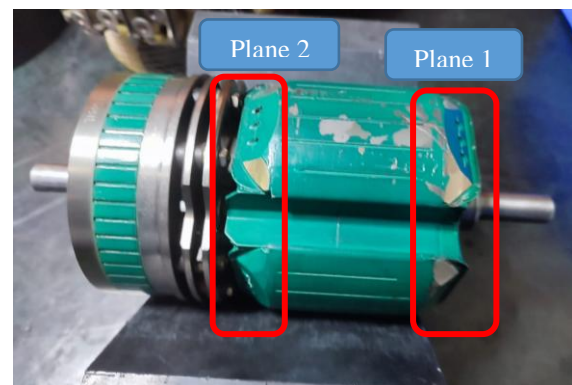
No.	Kejadian	Waktu (Jam)
1	Pesawat 1	524
2	Pesawat 2	433
3	Pesawat 3	715
4	Pesawat 4	649
5	Pesawat 5	2347
6	Pesawat 6	53
7	Pesawat 7	151
8	Pesawat 8	920
9	Pesawat 9	932
10	Pesawat 10	959
11	Pesawat 11	688
12	Pesawat 12	680
13	Pesawat 13	1053
14	Pesawat 14	152
15	Pesawat 15	302
16	Pesawat 16	238
17	Pesawat 17	215
18	Pesawat 18	237
19	Pesawat 19	54

Usia produktif dari ACW generator sendiri dapat digunakan hingga 2400 jam

dari pertama dipasang pada *engine* pesawat. Sehingga nilai ketahanan *seal* seharusnya dapat mengikuti usia produktif ACW generator, namun dari data grafik 4.3 nilai rata-rata kejadian yang hanya 25% dari masa target kerja komponen ACW generator tidak efektif dan efisien.

### b. Pengujian *Unbalanced*

Pengujian dilakukan terhadap 4 ACW generator pada mesin *Schenck Dynamic Balancing Machine* untuk mendapatkan nilai ketidak-seimbangan pada rotor. Nilai ambang batas ketidak-seimbangan maksimal yang diperbolehkan berdasarkan *maintenance manual* adalah 1,69 g.mm. pengujian dilakukan dengan mengambil nilai *unbalanced* pada *plane 1* dan *plane 2* pada gambar 3. *over unbalanced* merupakan nilai *plane* dikurangi batas nilai maksimal yang diperbolehkan yaitu 1,69 g.mm.



Gambar 3. Lokasi pengukuran *plane 1* dan *plane 2*

Pada tabel 3 ditunjukkan data *unbalanced* yang terjadi pada *plane 1* untuk 4 bahan uji. Dari hasil pengujian 4 bahan uji tersebut menunjukkan hasil *unbalanced* sebesar 15,29 g.mm, 10,16 g.mm, 4,76 g.mm, 12,88 g.mm dengan rata-rata *over unbalanced* sebesar 9,0825 g.mm. *Over unbalanced* adalah nilai *unbalanced* hasil pengukuran dikurangi nilai maksimal *unbalanced* yang diperbolehkan oleh *maintenance manual*. Nilai tersebut jauh melebihi batas ambang batas diijinkan *unbalanced* dengan data hasil tercatat 13,6 g.mm (805%), 8,47 g.mm (501%), 3,07 g.mm (182%) dan 11,9 g.mm (662%).

Tabel 3. Hasil Nilai Pengujian *Unbalanced Plane 1*

No	Komponen Serial Number	Plane 1 (g.mm)	Over unbalanced Plane 1 (g.mm)	% over unbalanced
1	AC3958	15,29	13,6	805%
2	AC3029	10,16	8,47	501%
3	AC3587	4,76	3,07	182%
4	AC3543	12,88	11,19	662%
Rata-rata		10,7725	9,0825	537%

Rotor dengan dan tanpa peredaman menurut metode elemen hingga dan memverifikasi bahwa peredaman memiliki dampak penekanan getaran tertentu dengan membandingkan respon [17].

Tabel 4. Hasil Nilai Pengujian *Unbalanced Plane 2*

No	Komponen Serial Number	Plane 2 (g.mm)	Over unbalanced Plane 2 (g.mm)	% over unbalanced
1	AC3958	20,74	19,05	1.127%
2	AC3029	18,81	17,12	1.013%
3	AC3587	1,91	0,22	13%
4	AC3543	12,77	11,08	656%
Rata-rata		13,5575	11,8675	702%

Tabel 5. Hasil Nilai Pengujian *Unbalanced Plane 1 dan Plane 2*

No	Komponen Serial Number	Plane 1 (g.mm)	Plane 2 (g.mm)	Total (plane 1 & Plane 2)	% over unbalanced
1	AC3958	15,29	20,74	36,03	2.132%
2	AC3029	10,16	18,81	28,97	1.714%
3	AC3587	4,76	1,91	6,67	395%
4	AC3543	12,88	12,77	25,65	1.518%
Rata-rata		10,7725	13,5575	24,33	1.440%

Pada tabel 4 menunjukkan data *unbalanced* yang terjadi pada *plane 1* untuk 4 bahan uji. Dari hasil pengujian 4 bahan uji tersebut menunjukkan hasil *unbalanced*

sebesar 20,74 g.mm, 18,81 g.mm, 1,91 g.mm, 12,77 g.mm dengan rata-rata over *unbalanced* sebesar 13,5575 g.mm. over *unbalanced* tersebut jauh melebihi batas ambang batas diijinkan *unbalanced* dengan data hasil tercatat 19,05 g.mm (1.127%), 17,12 g.mm (1.127%), 0,22 g.mm (13%) dan 11,08 g.mm (656%).

Pada Tabel 5 hasil nilai pengujian *unbalanced* pada 4 ACW generator menunjukkan nilai total *unbalanced* pada masing-masing benda uji adalah sebesar 36,03 g.mm (2.132%), 28,97 g.mm (1.714%), 6,67 g.mm (395%), 25,65 g.mm (1.518%).

Dari hasil yang diperoleh pada tabel 3, 4 dan 5 yang telah didapat nilai getaran. Respon ketidak - seimbangan multidisk dan multiplane dari sistem rotor ganda diperoleh, dan hukum transmisi getaran dan sensitivitas vibrasi rotor dalam keadaan tidak seimbang yang disebabkan oleh aksi rotor dalam-luar terungkap. Pingping juga menambahkan nilai ketidak seimbangan mempengaruhi tingkat vibrasi [7]. Dengan proses penyetimbangan yang telah dilakukan pada plan 1 dan 2 di alat bantu pada penelitian yang di lakukan dapat dilakukan penyetimbangan terhadap kedua rotor agar dinyatakan layak atau memenuhi standard yang telah di tentukan [18]. [19] dalam penelitiannya menyebutkan, didapatkan hasil bahwa dengan ditambahkan massa unbalance benda berputar dalam hal ini adalah benda uji dapat mengalami keadaan tak seimbang. Terlihat juga dengan semakin besar massa unbalance, akan semakin besar juga nilai getaran yang timbul akibat kondisi tak seimbang.

#### 4. Kesimpulan

Dari tabel 3, 4 dan 5 dapat diambil kesimpulan bahwa telah terjadi *unbalanced over limit* pada ke-4 bahan uji dengan rata-rata total *unbalanced* pada *plane 1* dan *plane 2* sebesar 22,33 g.mm (1.440%) atau sebesar 14x batas maksimal ambang batas yang diijinkan oleh maintenance manual yang memungkinkan terjadinya getaran pada *shaft rotor* dan menyebabkan kerusakan

pada seal sehingga menyebabkan kebocoran. Dari segi kepraktisan, lebih mudah menerapkan gaya yang *unbalanced* daripada gaya eksitasi karena tidak memerlukan perangkat yang canggih [18]. Respon getaran sistem poros rotor di bawah aksi tarikan magnetik yang tidak seimbang dan gaya mekanis yang tidak seimbang diperoleh dan metode optimasi multi-objektif digunakan untuk menekan getaran sistem poros rotor. Karakteristik getaran respon dari ketidak-seimbangan merupakan dasar penelitian untuk pengendalian keseimbangan aktif, yang merupakan metode penting dalam pemantauan dan pengendalian getaran [19]. Statistik dari penelitian yang dilakukan Leonardo [20] menunjukkan bahwa strategi terkait vibrasi yang diusulkan dapat menjadi kuat untuk mendiagnosis kondisi ketidak-seimbangan mesin berputar bahkan dalam skenario terburuk,

## Referensi

- [1] A. Z. dan D. Yusri, "Analisis Angkutan Kargo Antara ATR 72-600 Passenger," *J. Ilmu Pendidik.*, vol. 7, no. 2, pp. 809–820, 2020.
- [2] Y. Yang and G. Zha, "Conceptual Design of a Co-Flow Jet Hybrid Electric Regional Airliner," no. January, pp. 1–21, 2019, doi: 10.2514/6.2019-1584.
- [3] Y. Jia and K. Rajashekara, "An Induction Generator-Based AC/DC Hybrid Electric Power Generation System for More Electric Aircraft," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 3, pp. 2485–2494, 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2650862.
- [4] D. Kim, M. Asli, and K. Höschler, "On the Potentials of the Integration of Pressure Gain Combustion with a Hybrid Electric Propulsion System," *Aerospace*, vol. 10, no. 8, 2023, doi: 10.3390/aerospace10080710.
- [5] J. Anton and H. J. K. Ruff-Stahl, "Competitiveness of hybrid electric aircraft on short range scheduled flights," *Int. J. Aviat. Aeronaut. Aerosp.*, vol. 5, no. 3, 2018, doi: 10.15394/ijaaa.2018.1240.
- [6] M. Voskuijl, "Analysis and design of hybrid electric regional turboprop aircraft," *CEAS Aeronaut. J.*, vol. 9, no. 1, pp. 15–25, 2018, doi: 10.1007/s13272-017-0272-1.
- [7] M. Pingping, J. Zhai, Z. Wang, H. Zhang, and Q. Han, "Unbalance Vibration Characteristics and Sensitivity Analysis of the Dual-Rotor System in Aeroengines," *J. Aerosp. Eng.*, vol. 34, no. 1, pp. 1–12, 2021, doi: 10.1061/(asce)as.1943-5525.0001197.
- [8] C. Wang, D. Zhang, Y. Ma, Z. Liang, and J. Hong, "Theoretical and experimental investigation on the sudden unbalance and rub-impact in rotor system caused by blade off," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 76–77, pp. 111–135, 2016, doi: 10.1016/j.ymsp.2016.02.054.
- [9] S. Mamatov, D. Shin, and S. S. Park, "Investigation on leakage characteristics of two kinds of injection-type shaft seals using CFD," *Int. J. Fluid Mach. Syst.*, vol. 13, no. 3, pp. 635–645, 2020, doi: 10.5293/IJFMS.2020.13.3.635.
- [10] P. Nomikos, R. Rahmani, N. Morris, and H. Rahnejat, "An investigation of oil leakage from automotive driveshaft radial lip seals," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 237, no. 13, pp. 3108–3124, 2023, doi: 10.1177/09544070221127105.
- [11] A. I. Wulandari, S. Suardi, and M. Y. Ismail, "Analisis getaran dan kebisingan pada kamar mesin dan geladak penumpang kapal cepat Aluminium," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 2, pp. 264–271, 2021, doi: 10.24127/trb.v10i2.1754.
- [12] E. Y. Widiyanto and H. Hartopo, "Analisis Terjadinya High Oil Consumption Pada Lubrication System Pesawat Boeing 737-500 Pk-

- Ggf,” *J. INDEPT*, vol. 6, no. 1, pp. 9–15, 2016.
- [13] J. Lundberg, “Undocumented oil leakages A study about stern tube seals and leakages,” *Linnaeus Univ.*, no. Linnaeus Univ., 2022.
- [14] Y. H. Anoi, A. Yani, and B. A. Seto, “Analisis Penyebab dan Perbaikan Vibrasi Pada Fin Fan Blower F1-Ek-9-D1 Milik PT. Badak LNG Bontang,” *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 8, no. 1, pp. 48–55, 2019, doi: 10.24127/trb.v8i1.920.
- [15] S. M. Ibn Shamsah, J. K. Sinha, and P. Mandal, “Estimating rotor unbalance from a single run-up and using reduced sensors,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 136, pp. 11–24, 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2018.11.044.
- [16] S. M. Ibn Shamsah and J. K. Sinha, “Rotor unbalance estimation with reduced number of sensors,” *Machines*, vol. 4, no. 4, 2016, doi: 10.3390/machines4040019.
- [17] J. Wang *et al.*, “Typical Fault Modeling and Vibration Characteristics of the Turbocharger Rotor System,” *Machines*, vol. 11, no. 2, 2023, doi: 10.3390/machines11020311.
- [18] A. Wang *et al.*, “Continuous Rotor Dynamics of Multi-Disc and Multi-Span Rotor: A Theoretical and Numerical Investigation on Identification of Bearing Coefficients from Unbalance Responses,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 9, 2022, doi: 10.3390/app12094251.
- [19] D. Wang, W. Yang, J. Yang, K. Jiang, J. Zhang, and Y. Fu, “Research on the vibration characteristics and performance optimization of the rotor-shaft system of an unbalanced permanent magnet synchronous motor,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 37, no. 9, pp. 4425–4439, 2023, doi: 10.1007/s12206-023-0802-1.
- [20] L. S. Jablon, S. L. Avila, B. Borba, G. L. Mourão, F. L. Freitas, and C. A. Penz, “Diagnosis of rotating machine unbalance using machine learning algorithms on vibration orbital features,” *JVC/Journal Vib. Control*, vol. 27, no. 3–4, pp. 468–476, 2021, doi: 10.1177/1077546320929830.