

## ANALISIS THERMOELASTO-HYDRODYNAMIC PADA MULTILAYER GAS FOIL THRUST BEARING DENGAN VARIASI MATERIAL PELAPIS MENGGUNAKAN PENDEKATAN FLUID STRUCTURE INTERACTION(FSI)

\*Harits Thariq Athif<sup>1</sup>, Mohammad Tauviqirrahman<sup>2</sup>, Budi Setiyana<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

\*E-mail: haritsthariqathif@gmail.com

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan menganalisis secara mendalam perilaku thermoelastohidrodinamik (TEHD) yang terjadi pada multilayer gas foil thrust bearing (GFTB) yang telah dilapisi dengan material polimer rekayasa yaitu polytetrafluoroethylene (PTFE) dan polyetheretherketone (PEEK). Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi berbasis interaksi struktur-fluida (*fluid-structure interaction*) tiga dimensi yang terintegrasi dengan metode thermal-fluid-solid coupling, guna menangkap keterkaitan kompleks antara domain termal, fluida, dan struktur. Simulasi dilakukan dalam kondisi operasi yang terkontrol, yaitu kecepatan putaran poros yang tetap, beban aksial kontinu, temperatur lingkungan konstan, serta ketebalan lapisan film gas yang diasumsikan seragam. Fokus utama dari analisis ini adalah mengkaji pengaruh variasi jenis material pelapis terhadap kapasitas daya dukung beban (*load carrying capacity*) dan karakteristik deformasi elastis yang terjadi pada struktur bantalan. Hasil studi menunjukkan bahwa penggunaan lapisan pelindung berbahan PTFE dan PEEK memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan performa kinerja bantalan, baik dari segi peningkatan kekakuan struktural maupun efisiensi dukungan beban, serta mampu menurunkan intensitas efek thermoelastohidrodinamik jika dibandingkan dengan konfigurasi bantalan tanpa pelapis. Penelitian ini memberikan wawasan yang berguna dalam pengembangan desain bantalan gas berlapis multilayer untuk aplikasi berkecepatan tinggi yang memerlukan stabilitas termomekanik dan sifat tribologis yang unggul.

**Kata kunci:** analisis *thermoelasto-hydrodynamic*; material pelapis; *multilayer gas foil thrust bearing*; sifat tribologis; simulasi *thermal-fluid-solid coupling*

### Abstract

*This study aims to thoroughly evaluate and analyze the thermoelasto-hydrodynamic (TEHD) behavior occurring in multilayer gas foil thrust bearings (GFTB) coated with engineered polymer materials, namely polytetrafluoroethylene (PTFE) and polyetheretherketone (PEEK). The approach employed in this research is a three-dimensional simulation based on fluid-structure interaction (FSI) integrated with a thermal-fluid-solid coupling method, in order to capture the complex interrelation between thermal, fluid, and structural domains. Simulations are carried out under controlled operating conditions, including constant shaft rotational speed, continuous axial load, steady ambient temperature, and a uniform gas film thickness. The primary focus of the analysis is to examine the influence of coating material variations on the load-carrying capacity and the elastic deformation characteristics of the bearing structure. The results indicate that the application of PTFE and PEEK protective coatings significantly improves the bearing's performance in terms of structural stiffness and load support efficiency, and also reduces the intensity of TEHD effects compared to uncoated configurations. This research provides valuable insights into the development of multilayer gas bearing designs for high-speed applications that require thermomechanical stability and superior tribological properties.*

**Keywords:** *coating materials; multilayer gas foil thrust bearing; thermal-fluid-solid coupling simulation; thermoelasto-hydrodynamic analysis; tribological properties*

### 1. Pendahuluan

*Thrust bearing* adalah komponen mesin yang menahan beban aksial dari poros berputar [1]. GFB memanfaatkan aliran gas akibat gesekan poros berkecepatan tinggi untuk membentuk film gas pelumas, dengan fleksibilitas foil

meningkatkan stabilitas [2]. Dibanding bearing oli, GFB unggul dalam toleransi *misalignment*, kecepatan tinggi, gesekan rendah, ramah lingkungan, suhu operasi luas, stabil, dan perawatan rendah [3]. GFB umum digunakan di mikro turbin gas, sistem udara pesawat, dan kompresor sel bahan bakar [4,5].

Untuk meningkatkan kinerja GFB, banyak pengembangan dilakukan pada desain dan mekanisme pembebanan. Bentuk bearing dan struktur foil sangat memengaruhi kapasitas beban dan stabilitas. Modifikasi seperti *foil bump* bertumpuk, kemiringan, dan bentuk *wedge* cembung terbukti meningkatkan performa. Ketebalan dan jumlah foil juga berpengaruh terhadap kekakuan dan karakteristik dinamis. *Multilayer foil* memberikan kekakuan lebih tinggi dan kapasitas beban lebih besar. Inovasi seperti gas foil cone bearing memungkinkan penahanan beban aksial dan radial secara bersamaan, memperluas aplikasi pada sistem rotor modern.

Efek termal menjadi tantangan utama pada GFB, terutama di kecepatan tinggi. Gesekan-viskos dalam lapisan udara dapat menyebabkan kenaikan suhu signifikan yang memengaruhi performa dan stabilitas. Studi menunjukkan suhu meningkat secara eksponensial terhadap kecepatan rotasi, terutama pada celah bearing kecil. Pengaruh suhu terhadap kapasitas beban lebih besar pada kecepatan tinggi dibanding rendah. Model TEHD juga menunjukkan bahwa dissipasi viskos bertanggung jawab atas mayoritas panas dalam film gas [6].

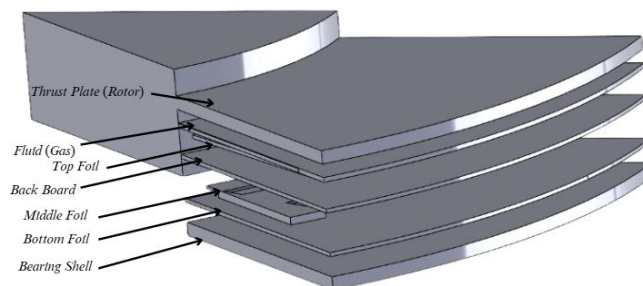
Pemilihan material thrust bearing sangat berpengaruh terhadap kinerja. Material komposit seperti serat karbon-resin menawarkan kekuatan tinggi, ringan, tahan aus dan korosi, serta mengurangi inersia poros [7]. PEEK menunjukkan koefisien gesek rendah dan stabilitas tinggi, cocok untuk kondisi ekstrem [8]. PTFE juga terbukti memiliki gesekan lebih rendah dibanding babbitt, terutama saat start-up kering. Beberapa studi menunjukkan material ini tetap efektif meski dalam kondisi kehilangan pelumasan [9].

## 2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini berbasis simulasi numerik dengan menggunakan perangkat lunak ansys 2020 R2, Computational Fluid Dynamic (CFD) untuk menggambarkan aliran fluida, Steady State Thermal untuk menggambarkan perubahan suhu, System Coupling untuk menggabungkan simulasi CFD dan Steady State Thermal, serta Static Structural untuk melihat bagaimana deformasi dan stress yang terjadi pada struktur multilayer gas foil thrust bearing. Terdapat beberapa Langkah dalam melakukan simulasi numerik, diantaranya tahap pre-processing, tahap processing, dan tahap post-processing. Tahap pre-processing merupakan tahapan sebelum dilakukan perhitungan numerik, di mana terdiri dari pembuatan geometri sesuai dengan sumber acuan yang telah ditentukan, meshing yang telah memenuhi hasil uji grid independent dan juga kualitas skewness dan orthogonal quality yang sesuai dengan standar dari ansys, penentuan jenis aliran, model turbulensi, kondisi cell zone, boundary condition, dan properties material yang akan disimulasikan. Sementara itu, tahap processing merupakan tahapan di mana perhitungan fenomena yang dilakukan secara komputasional oleh software berdasarkan persamaan dan kondisi yang sudah diatur sebelumnya. Sedangkan, tahap post-processing ialah tahapan di mana pengumpulan data hasil simulasi, tampilan visual berupa kontur, vector, pathline, dan juga grafik hasil perhitungan, berupa load carrying capacity dan equivalent stress pada beberapa bagian.

### 2.1 Geometri Penelitian

Geometri pada Multilayer Gas Foil Thrust Bearing yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada jurnal yang berjudul “Thermo-elasto-hydrodynamic analysis of a specific multi-layer gas foil thrust bearing under thermal-fluid-solid coupling” dan “Optimal design of top-foil wedge shape for a specific multi-layer gas foil thrust bearing by considering aerodynamic and thermal performances” yang keduanya ditulis oleh [10]. Geometri yang disimulasikan dibagi menjadi tujuh bagian, yaitu *Fluid (Gas)*, *Thrust Plate (Rotor)*, *Top Foil*, *Middle Foil*, *Bottom Foil*, dan *Bearing Shell*.



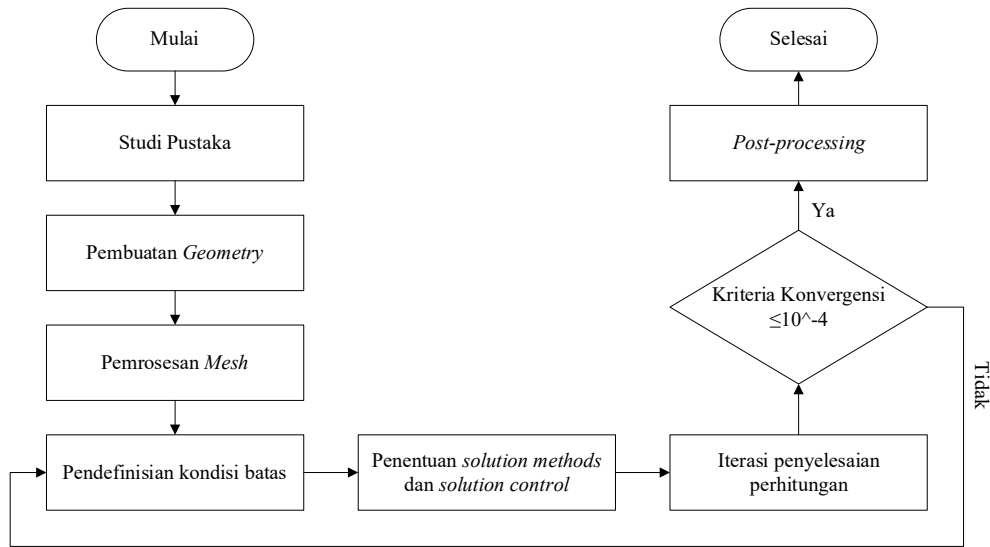
**Gambar 1.** Konfigurasi pada multilayer gas foil thrust bearing

Untuk mempermudah proses simulasi dan mengoptimalkan efisiensi komputasi, geometri *multilayer gas foil thrust bearing* yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi 1/8 bagian dari geometri aslinya, yang setara dengan sektor sudut sebesar 45 derajat dari model keseluruhan. Pembagian ini dilakukan dengan mempertimbangkan simetri periodik dari desain bearing, sehingga memungkinkan pengurangan kompleksitas komputasi tanpa mengorbankan

akurasi hasil simulasi. Dengan demikian, simulasi dapat dilakukan dengan waktu pemrosesan yang lebih singkat dan penggunaan sumber daya komputasi yang lebih efisien, sambil tetap mempertahankan representasi yang valid terhadap fenomena thermoelastohydrodynamic yang terjadi pada bearing.

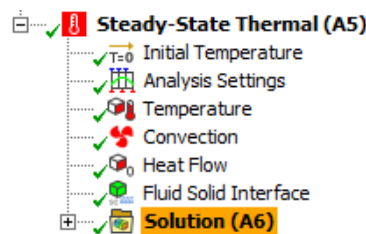
### 2.2 Simulation Setup

Pada penelitian, simulasi pada domain fluida menggunakan ANSYS Fluent (CFD), berbeda dengan eksperimen yang keakuratannya bergantung pada alat ukur, akurasi hasil CFD ditentukan oleh kualitas diskritisasi. Oleh karena itu, digunakan metode Finite Volume Method yang mendukung kinerja ANSYS Fluent. Dengan kecepatan putaran rotor 50.000 RPM, *inlet* dan *outlet* yang memiliki tekanan yang sama yaitu 0,6 MPa. Berikut merupakan diagram alir simulasi pada ANSYS Fluent



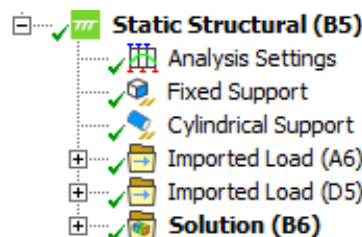
**Gambar 2.** Diagram alir simulasi pada ANSYS Fluent

Untuk menganalisis kondisi termal pada thrust bearing, digunakan solver ANSYS Steady-State Thermal. Simulasi ini mempertimbangkan perpindahan panas melalui konduksi dan konveksi. Gambar 5 menunjukkan tampilan project pada ANSYS Steady state thermal.



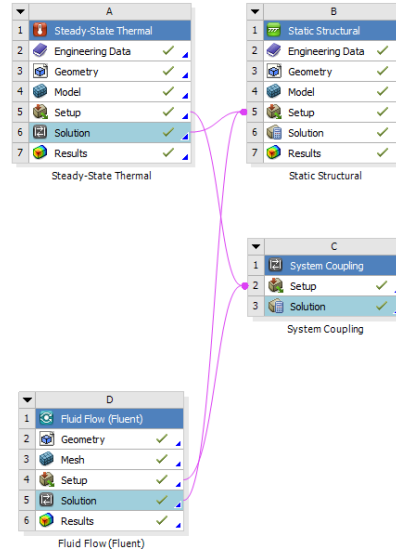
**Gambar 3.** Tampilan setup pada ANSYS Steady-State Thermal

Perpindahan pada thrust plate dapat memengaruhi performa bearing melalui perubahan ketebalan fluida. Untuk menganalisis respons struktur akibat hal ini, digunakan ANSYS Static Structural. Gambar 6 menunjukkan tampilan project pada ANSYS Structural.



**Gambar 4.** Tampilan setup pada ANSYS Static structural

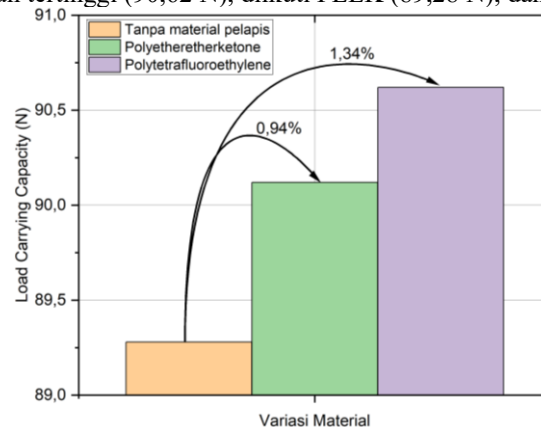
Interaksi antara fluida dan struktur dapat saling memengaruhi kondisi fisiknya. Untuk mempertimbangkan hal ini, digunakan metode *Two-Way System Coupling*, yang memungkinkan pertukaran data antara domain fluida dan struktur secara simultan hingga mencapai keseimbangan. Metode ini meningkatkan akurasi simulasi. Gambar 7 menunjukkan project schematic, dan diagram alir FSI ditampilkan berikutnya.



**Gambar 5.** Project Schematic untuk System Coupling pada penelitian

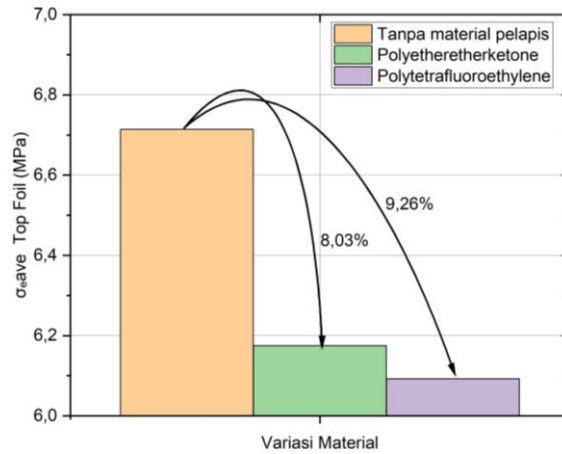
### 3. Hasil dan Pembahasan

Subbab ini membahas analisis pengaruh material pelapis terhadap fenomena *thermoelasto-hydrodynamic* pada *multilayer gas foil thrust bearing* menggunakan geometri dari. Simulasi dilakukan pada kecepatan 50.000 rpm dengan metode *two-way* FSI, mempertimbangkan efek temperatur, deformasi, dan equivalent stress pada foil dan stator. Pada Kasus I, dilakukan tiga simulasi: tanpa pelapis, pelapis 10% top foil (PTFE), dan pelapis 10% stator (PEEK). Hasil yang diperoleh meliputi grafik, residual, LCC, serta kontur temperatur, deformasi, dan equivalent stress. Parameter pre-processing mencakup kecepatan 50.000 rpm, suhu lingkungan 363 K, dan skema *thermal-fluid-solid coupling*. Kondisi ini digunakan sebagai acuan untuk menilai pengaruh material pelapis terhadap fenomena *thermoelasto-hydrodynamic*. Daya dukung beban stabil di sekitar 89,28 N, menunjukkan simulasi konvergen dan stabil. Grafik residual menunjukkan penurunan signifikan di awal iterasi, lalu stabil, menandakan kestabilan numerik meskipun tanpa pelapis. Simulasi ANSYS FSI dengan variasi material pelapis 10% pada stator dilakukan untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap temperatur, deformasi, dan *equivalent stress*. Tujuannya adalah mengidentifikasi konfigurasi terbaik untuk meningkatkan efisiensi multilayer gas foil thrust bearing. Gambar 9 menunjukkan bahwa penggunaan pelapis meningkatkan performa. PTFE memberikan daya dukung beban tertinggi (90,62 N), diikuti PEEK (89,28 N), dan tanpa pelapis (88 N).



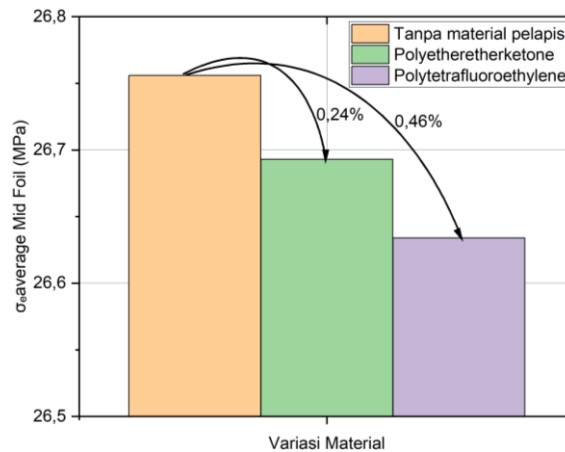
**Gambar 6.** Perbandingan load carrying capacity antar material pelapis

Gambar 10 menunjukkan bahwa penggunaan material pelapis pada top foil menurunkan nilai equivalent stress rata-rata dibandingkan kondisi tanpa pelapis (Inconel 718). Tanpa pelapis, tegangan mencapai 6,71 MPa, sedangkan dengan pelapis PEEK dan PTFE menurun menjadi sekitar 6,38 MPa dan 6,1 MPa. Penurunan ini masing-masing sebesar 8,03% dan 9,26%. Gaya sentrifugal akibat putaran *thrust plate* mengarahkan aliran fluida ke area dengan radius lebih besar, sehingga menghasilkan tegangan lebih tinggi. Tegangan tinggi juga terdeteksi pada area top foil yang memiliki perbedaan ketinggian (*wedge*).



**Gambar 7.** Perbandingan *equivalent stress* rata-rata top foil pada variasi material pelapis

Gambar 11 menunjukkan penurunan *equivalent stress* rata-rata dibandingkan kondisi tanpa pelapis, meskipun penurunannya relatif kecil. Pada kondisi tanpa pelapis, tegangan ekuivalen rata-rata mencapai sekitar 26,75 MPa, sedangkan dengan pelapis PEEK dan PTFE mengalami penurunan masing-masing sebesar 0,24% dan 0,46% atau 26,69 MPa dan 26,64 MPa. Tegangan tinggi pada area penghubung antara bagian yang berkontak dengan top foil dan bagian yang berkontak dengan bottom foil disebabkan oleh perbedaan ketebalan antara kedua bagian tersebut dan bagian penghubungnya.



**Gambar 8.** Perbandingan *equivalent stress* rata-rata mid foil pada variasi material pelapis

Berdasarkan hasil simulasi, perbandingan antara stator tanpa pelapis, dengan pelapis PTFE, dan PEEK menunjukkan bahwa penggunaan material pelapis meningkatkan performa multilayer gas foil thrust bearing. PTFE memberikan daya dukung beban tertinggi sebesar 90,62 N, diikuti PEEK 89,28 N, dan tanpa pelapis 88 N. Dari sisi *equivalent stress*, PTFE menunjukkan performa terbaik dengan nilai maksimum pada top foil sebesar 69,028 MPa (rata-rata 6,1713 MPa), disusul PEEK 69,932 MPa (6,3841 MPa), dan tanpa pelapis 77,899 MPa (6,7141 MPa). Untuk middle foil, tegangan maksimum tanpa pelapis mencapai 593,7 MPa (rata-rata 26,756 MPa), dengan PEEK 590,23 MPa (26,697 MPa), dan PTFE 589,9 MPa (26,642 MPa).

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis thermoelasto-hydrodynamic (TEHD) pada multilayer gas foil thrust bearing (GFTB) dengan variasi material pelapis, disimpulkan beberapa hal penting:

1. Penggunaan material pelapis, khususnya Polytetrafluoroethylene (PTFE) dan Polyetheretherketone (PEEK), secara signifikan meningkatkan performa GFTB. PTFE menunjukkan daya dukung beban (load carrying capacity) tertinggi sebesar 90,62 N, diikuti PEEK sebesar 89,28 N, dibandingkan dengan konfigurasi tanpa pelapis yang hanya mencapai 88 N.

2. Penelapan lapisan pelindung PTFE dan PEEK berkontribusi pada penurunan nilai *equivalent stress* rata-rata pada *top foil* dan *middle foil*. Pada *top foil*, tegangan rata-rata menurun menjadi 6,1 MPa untuk PTFE dan 6,38 MPa untuk PEEK, dibandingkan 6,71 MPa tanpa pelapis. Demikian pula pada *middle foil*, terjadi penurunan *equivalent stress* rata-rata, meskipun relatif kecil, dari 26,75 MPa tanpa pelapis menjadi 26,64 MPa dengan PTFE dan 26,69 MPa dengan PEEK.

3. Penurunan *equivalent stress* dan peningkatan kapasitas daya dukung beban mengindikasikan peningkatan kekakuan struktural dan efisiensi dukungan beban, serta kemampuan material pelapis untuk menurunkan intensitas efek thermoelastohidrodinamik.

#### 5. Daftar Pustaka

- [1] M. A. Wavizayyan and M. Tauviqirrahman, "ANALISIS PENGARUH FILM THICKNESS , PANJANG POCKET , DAN KEKASARAN PERMUKAAN TERHADAP KARAKTERISTIK THERMOHYDRODYNAMIC OPEN POCKET THRUST BEARING DENGAN MENGGUNAKAN CFD ( COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS )," vol. 9, no. 4, pp. 545–548, 2021.
- [2] H. Heshmat, "Advancements in the performance of aerodynamic foil journal bearings: High speed and load capability," *J. Tribol.*, vol. 116, no. 2, pp. 287–294, 1994, doi: 10.1115/1.2927211.
- [3] Y. Hu, P. Ding, F. Wu, X. Wang, B. Liang, and Y. Meng, "Theoretical and experimental research on static stiffness, performance, and lift-off characteristics of multi-layer gas foil thrust bearings," *Friction*, vol. 12, no. 11, pp. 2458–2479, 2024, doi: 10.1007/s40544-024-0889-0.
- [4] G. L. Agrawal, "Foil air/gas bearing technology - An overview," *Proc. ASME Turbo Expo*, vol. 1, no. June, 1997, doi: 10.1115/97-GT-347.
- [5] P. Samanta, N. C. Murmu, and M. M. Khonsari, "The evolution of foil bearing technology," *Tribol. Int.*, vol. 135, no. November 2018, pp. 305–323, 2019, doi: 10.1016/j.triboint.2019.03.021.
- [6] C. Xiong, B. Xu, H. Yu, Z. Huang, and Z. Chen, "A thermo-elastic-hydrodynamic model for air foil thrust bearings considering thermal seizure and failure analyses," *Tribol. Int.*, vol. 183, no. September 2022, 2023, doi: 10.1016/j.triboint.2023.108373.
- [7] K. G. Bang and D. G. Lee, "Thrust bearing design for high-speed composite air spindles," *Compos. Struct.*, vol. 57, no. 1–4, pp. 149–160, 2002, doi: 10.1016/S0263-8223(02)00067-3.
- [8] M. Wasilczuk and M. Wodtke, "Experimental study on the feasibility of alternative materials for tilting pad thrust bearings operating in transition to mixed friction," *Friction*, vol. 12, no. 4, pp. 812–822, 2024, doi: 10.1007/s40544-023-0838-3.
- [9] T. Leister, "Dynamics of rotors on refrigerant-lubricated gas foil bearings To cite this version : HAL Id : tel-03213648 Dynamics of Rotors on Refrigerant- Lubricated Gas Foil Bearings," 2021.
- [10] Q. GAO, W. SUN, and J. ZHANG, "Thermo-elasto-hydrodynamic analysis of a specific multi-layer gas foil thrust bearing under thermal-fluid–solid coupling," *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 36, no. 12, pp. 231–246, 2023, doi: 10.1016/j.cja.2023.07.035.