

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

*Rhinoe Bima Amanta Sucaksono¹, Mohammad Tauviqirrahman², Budi Setiyana²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*E-mail: rhinoebima97@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi material pelapis (polimer, komposit, logam, dan keramik) terhadap fenomena thermo-elasto-hydrodynamic pada *multilayer gas foil thrust bearing* yang beroperasi pada kecepatan 100.000 RPM. Tantangan utama pada mesin berkecepatan tinggi ini adalah interaksi *thermal-fluid-solid* kompleks yang dapat membatasi kapasitas beban serta stabilitas sistem. Melalui simulasi *fluid-structure interaction* (FSI) tiga dimensi, ditemukan bahwa penggunaan pelapis meningkatkan kinerja bantalan dibandingkan kondisi tanpa pelapis. Material *Polytetrafluoroethylene* (PTFE) menunjukkan hasil paling optimal dengan kapasitas beban tertinggi mencapai 99,91 N (naik 1,28%), penurunan suhu *middle foil* menjadi 403,05 K, serta reduksi *equivalent stress* pada *top foil* sebesar 8,69%. Peringkat performa selanjutnya diikuti oleh PEEK, YSZ, Ti-6Al-4V, dan NiCr+hBN. Hasil ini mengindikasikan bahwa karakteristik koefisien gesek dan modulus elastisitas yang rendah pada material polimer sangat efektif dalam mendistribusikan tekanan fluida sekaligus meminimalkan distorsi termal. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pemilihan material pelapis yang tepat sangat krusial untuk menjaga stabilitas operasional pada aplikasi *turbomachinery* berkecepatan tinggi secara berkelanjutan.

Kata Kunci: *fluid-structure interaction*; material pelapis; *multilayer gas foil thrust bearing*; thermo-elasto-hydrodynamic

Abstract

This research investigates the influence of various coating materials-polymer, composite, metal, and ceramic-on the thermo-elasto-hydrodynamic phenomena of *multilayer gas foil thrust bearings* operating at high speeds of 100,000 RPM. The primary challenges in such high-speed machinery involve complex thermal-fluid-solid interactions that can significantly limit load capacity and overall system stability. Through three-dimensional fluid-structure interaction (FSI) simulations using thermal-fluid-solid coupling, findings reveal that coatings substantially enhance bearing performance compared to uncoated benchmarks. Polytetrafluoroethylene (PTFE) yielded the most optimal results, achieving a peak load capacity of 99.91 N (a 1.28% increase), reducing middle foil temperatures to 403.05 K, and decreasing top foil equivalent stress by 8.69%. Subsequent performance rankings include PEEK, YSZ, Ti-6Al-4V, and NiCr+hBN. These results indicate that the low friction coefficient and low elastic modulus characteristic of polymer materials are highly effective in distributing fluid pressure while minimizing thermal distortion. Consequently, selecting appropriate coating materials is essential for maintaining operational stability in turbomachinery.

Keywords: coating material; fluid-structure interaction (fsi); gas foil thrust bearing; multilayer gas foil thrust bearing

1. Pendahuluan

Thrust bearing memegang peranan vital dalam menopang beban aksial pada permesinan berkapasitas tinggi seperti turbin dan pembangkit listrik [1]. Pengembangan teknologi ini terus mengarah pada efisiensi yang lebih tinggi, salah satunya melalui penggunaan air sebagai pelumas pada *hydrostatic thrust bearings* guna meningkatkan akurasi dan karakteristik dinamis melalui optimasi bentuk lubang masuk (*feed hole*) [2]. Selain itu, inovasi seperti *hybrid thrust foil bearing* (HFTB) yang mengintegrasikan injeksi udara bertekanan tinggi telah dikembangkan untuk meningkatkan kapasitas beban pada kecepatan nol sekaligus meminimalkan gesekan saat fase *start-up* dan *shutdown* [3].

Tantangan utama pada pengoperasian bantalan gas, terutama pada kecepatan tinggi, adalah timbulnya panas berlebih akibat gesekan viskos (*viscous shearing*) yang intens di dalam lapisan film gas yang sangat tipis [1, 4]. Peningkatan suhu ini memicu deformasi termal yang dapat menurunkan efisiensi dan keandalan sistem, sehingga analisis menggunakan model *thermo-elasto-hydrodynamic* (TEHD) sangat krusial untuk memahami interaksi antara distribusi tekanan fluida dan deformasi termomekanik [4, 5]. Optimasi geometri seperti bentuk profil *wedge* pada *top-foil* menjadi

sangat penting untuk menyeimbangkan performa aerodinamis dan manajemen termal pada kondisi operasional ekstrim [4].

Untuk meningkatkan stabilitas struktural dan daya dukung beban, penggunaan struktur *multi-layer foil* dieksplorasi karena mampu memberikan kekakuan pendukung yang lebih baik melalui koordinasi deformasi antar lapisan foil [6]. Peningkatan performa lebih lanjut dapat dicapai melalui modifikasi desain, seperti penambahan alur spiral (*spiral grooves*) pada *top-foil* yang mampu meningkatkan kapasitas beban secara signifikan [7]. Selain modifikasi struktural, optimasi distribusi tekstur permukaan dengan mempertimbangkan kondisi batas kavitasi juga telah terbukti efektif dalam membangun tekanan hidrodinamik yang lebih tinggi untuk mendukung beban aksial [8].

Di sisi lain, keandalan sistem ini sangat sensitif terhadap gangguan teknis seperti kesalahan manufaktur pada ketebalan *pad* yang dapat mengganggu karakteristik statis bantalan secara signifikan [9]. Adanya cacat atau defek pada permukaan *pad* juga dapat mengganggu stabilitas pelumasan dan memicu kegagalan sistem jika suhu maksimum melampaui batas toleransi material [10]. Oleh karena itu, pemilihan material pelapis (*coating*) yang tepat menjadi strategi krusial untuk perlindungan permukaan dan meminimalkan distorsi termomekanik pada kecepatan tinggi.

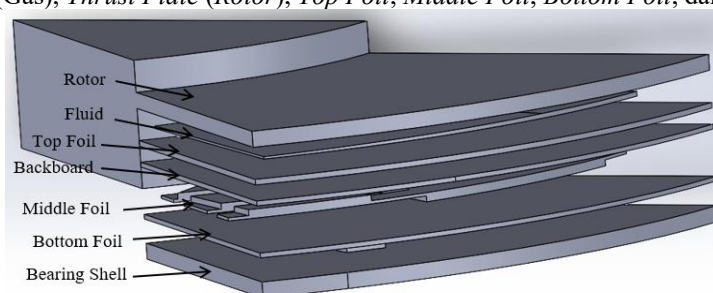
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi material pelapis berbasis polimer (PEEK, PTFE), komposit (NiCr+hBN), logam (Ti-6Al-4V), dan keramik (YSZ) terhadap karakteristik TEHD pada *multilayer gas foil thrust bearing*. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan *fluid-structure interaction* (FSI) tiga dimensi dengan metode *thermal-fluid-solid coupling* pada kecepatan rotasi konstan 100.000 RPM. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diidentifikasi material pelapis paling optimal yang mampu mendistribusikan tekanan fluida secara efektif sekaligus mereduksi tegangan termomekanik guna meningkatkan keandalan sistem permesinan berkecepatan tinggi.

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 [4]. Geometri yang disimulasikan dibagi menjadi tujuh bagian, yaitu *Fluid* (Gas), *Thrust Plate* (Rotor), *Top Foil*, *Middle Foil*, *Bottom Foil*, dan *Bearing Shell*.

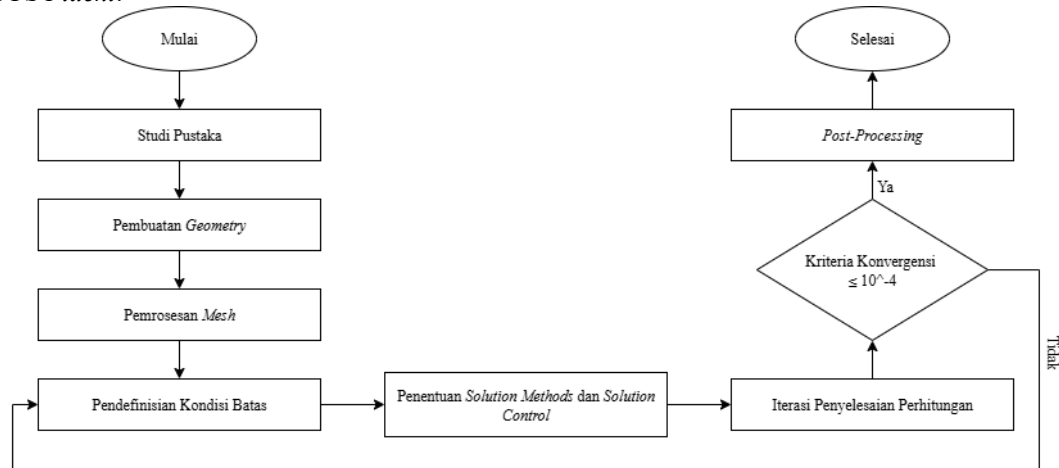


Gambar 1. Konfigurasi pada *multilayer gas foil thrust bearing*

Geometri *thrust bearing multilayer gas foil* yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi 1/8 bagian dari geometri aslinya, yang setara dengan sektor sudut 45 derajat dari model keseluruhan, untuk mempermudah proses simulasi dan mengoptimalkan efisiensi komputasi. Mempertimbangkan simetri periodik dari desain *bearing* memungkinkan simulasi dilakukan dengan waktu pemrosesan yang lebih singkat dan menggunakan sumber daya komputasi yang lebih efisien sambil mempertahankan representasi yang valid dari fenomena *thermoelastohydrodynamic* yang terjadi pada *bearing*.

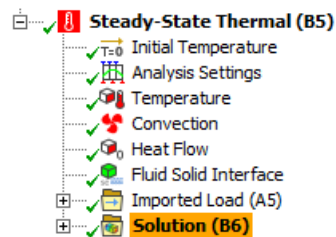
2.2 Simulation Setup

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 diskretisasi. Oleh karena itu, digunakan metode *Finite Volume Method* yang mendukung kinerja ANSYS *Fluent*. Dengan kecepatan putaran rotor 100.000 RPM, *inlet* dan *outlet* yang memiliki tekanan yang sama yaitu 0,6 MPa. Berikut merupakan diagram alir simulasi pada ANSYS *Fluent*.



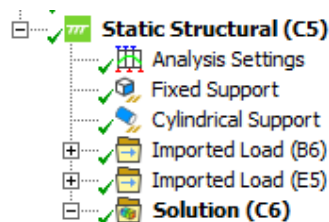
Gambar 2. Diagram alir simulasi pada ANSYS *Fluent*

Untuk menganalisis kondisi termal pada *thrust bearing*, digunakan solver ANSYS *Steady-State Thermal*. Simulasi ini mempertimbangkan perpindahan panas melalui konduksi dan konveksi. Gambar 3 menunjukkan tampilan project pada ANSYS *Steady state thermal*.



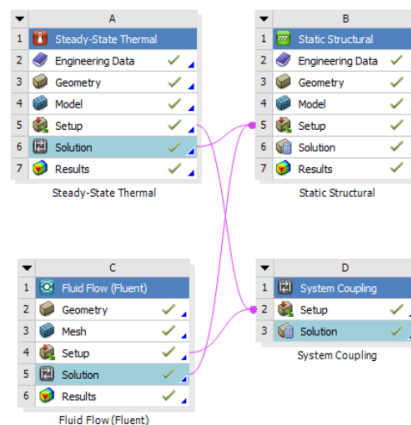
Gambar 3. Tampilan *setup* pada ANSYS *Steady-State Thermal*

Perpindahan pada *thrust plate* dapat memengaruhi performa *bearing* melalui perubahan ketebalan fluida. Untuk menganalisis respons struktur akibat hal ini, digunakan ANSYS *Static Structural*. Gambar 4 menunjukkan tampilan project pada ANSYS *Structural*.



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

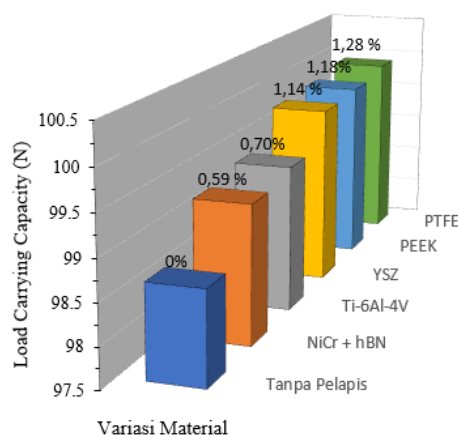
Interaksi antara fluida dan struktur dapat saling memengaruhi kondisi fisiknya. Untuk mempertimbangkan hal ini, digunakan metode Two-Way System Coupling, yang memungkinkan pertukaran data antara domain fluida dan struktur secara simultan hingga mencapai keseimbangan. Metode ini meningkatkan akurasi simulasi. Gambar 5 menunjukkan project schematic, dan diagram alir FSI ditampilkan berikutnya.



Gambar 5. Project Schematic untuk System Coupling pada penelitian

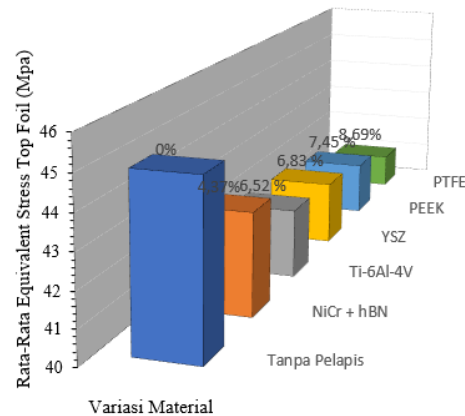
3. Hasil dan Pembahasan

Subbab ini membahas analisis pengaruh material pelapis terhadap fenomena *thermoelasto-hydrodynamic* pada *multilayer gas foil thrust bearing*. Simulasi dilakukan pada kecepatan 100.000 rpm dengan metode *two-way FSI*, mempertimbangkan efek temperatur, deformasi, dan *equivalent stress* pada *foil* dan *stator*. Pada Kasus ini, dilakukan enam simulasi: tanpa pelapis, pelapis 10% *top foil* (PTFE), pelapis 10% *top foil* (PEEK), pelapis 10% *top foil* (YSZ), pelapis 10% *top foil* (Ti-6Al-4V), dan pelapis 10% *top foil* (NiCr+hBN). Hasil yang diperoleh meliputi grafik, residual, LCC, serta kontur temperatur, deformasi, dan *equivalent stress*. Parameter *pre-processing* mencakup kecepatan 100.000 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 98,65 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 6 menunjukkan bahwa penggunaan pelapis meningkatkan performa. PTFE memberikan daya dukung beban tertinggi (99,91 N), diikuti PEEK (99,81 N), YSZ (99,77 N), Ti-6Al-4V (99,34 N), NiCr+hBN (99,23 N), dan tanpa pelapis (98,65 N).



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

Gambar 7 menunjukkan hasil simulasi rata-rata *equivalent stress* yang terjadi pada *top foil* dengan variasi material pelapis. Nilai tegangan ekuivalen rata-rata terendah dicapai oleh konfigurasi PTFE sebesar 41,027 MPa, diikuti secara berurutan oleh PEEK sebesar 41,588 MPa, YSZ sebesar 41,864 MPa, Ti-6Al-4V sebesar 42,005 MPa, dan NiCr+hBN sebesar 42,972 MPa, sedangkan nilai tegangan tertinggi terjadi pada kondisi tanpa pelapis sebesar 44,934 MPa.



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

Berdasarkan data yang diperoleh dan diinterpretasikan pada Gambar 6 s.d. 8, perbandingan performa antara *stator* tanpa material pelapis dengan berbagai variasi pelapis (NiCr+hBN, Ti-6Al-4V, YSZ, PEEK, PTFE) menunjukkan bahwa penggunaan material pelapis secara umum memberikan peningkatan kinerja pada *multilayer gas foil thrust bearing*. PTFE mencatatkan kapasitas menahan beban (*load carrying capacity*) tertinggi sebesar 99,91 N, diikuti secara berturut-turut oleh PEEK sebesar 99,81 N, YSZ sebesar 99,77 N, Ti-6Al-4V sebesar 99,34 N, dan NiCr+hBN sebesar 99,23 N, sedangkan nilai terendah terdapat pada *stator* tanpa pelapis sebesar 98,65 N. Secara keseluruhan, data ini mengonfirmasi bahwa penambahan lapisan pelindung, mulai dari komposit, logam, keramik, hingga polimer, secara konsisten meningkatkan stabilitas termomekanik bantalan, dengan material polimer (PTFE dan PEEK) memberikan dampak optimasi yang paling signifikan.

4. Kesimpulan

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

- Penggunaan material pelapis pada *stator* terbukti meningkatkan performa *multilayer gas foil thrust bearing* dibandingkan kondisi tanpa pelapis. Material PTFE memberikan peningkatan *load carrying capacity* tertinggi mencapai 99,91 N atau naik sebesar 1,28%, diikuti oleh PEEK (1,18%), YSZ (1,14%), Ti-6Al-4V (0,70%), dan NiCr+hBN (0,59%) dibandingkan *stator* tanpa pelapis yang hanya mencapai 98,65 N.
- Dari sisi integritas struktur, lapisan PTFE dan PEEK memberikan kontribusi terbaik dalam menurunkan *equivalent stress* dan deformasi. Tegangan rata-rata pada *top foil* mengalami penurunan terbesar pada variasi PTFE sebesar 8,69% (menjadi 41,027 MPa) dibandingkan tanpa pelapis (44,934 MPa). Hal ini menunjukkan bahwa modulus elastisitas yang rendah pada material pelapis polimer membantu mendistribusikan beban tekanan fluida secara lebih merata dan mengurangi konsentrasi tegangan lokal.

5. Daftar Pustaka

- [1] J. A. Bhat, G. A. Harmain, M. F. Wani, R. Sehgal, and F. A. Najar, "Performance enhancement of hydrodynamic thrust bearings: Investigating cooling strategies, deep recesses, and textured surfaces," *Tribology International*, vol. 211, p. 110877, 2025.
- [2] H. Ueda, M. Saito, Y. Kawamura, S. Kawada, and M. Miyatake, "Study on static and dynamic characteristics of water-lubricated hydrostatic thrust bearings - Effect of feed hole inlet shape on bearing characteristics," *Tribology International*, vol. 191, p. 109127, 2024.
- [3] E. Ebewele, D. Kim, and J. Ki, "Analytical study on hybrid thrust foil bearing, structural characterization and measurement of static performance," *Tribology International*, vol. 200, p. 110079, 2024.
- [4] Q.-h. Gao, W.-j. Sun, and J. Zhang, "Optimal design of top-foil wedge shape for a specific multi-layer gas foil thrust bearing by considering aerodynamic and thermal performances," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 44, p. 102060, 2023.
- [5] J. Shi, B. Zhao, T. He, L. Tu, X. Lu, and H. Xu, "Tribology and dynamic characteristics of textured journal-thrust coupled bearing considering thermal and pressure coupled effects," *Tribology International*, vol. 180, p. 108292, 2023.
- [6] C. Li, J. Du, and Y. Yao, "Modeling of a multi-layer foil gas thrust bearing and its load carrying mechanism study," *Tribology International*, vol. 114, pp. 172–185, 2017.
- [7] E. Guenat and J. Schiffmann, "Performance potential of gas foil thrust bearings enhanced with spiral grooves," *Tribology International*, vol. 131, pp. 438–445, 2019.

-
- [8] Y. Li, Z. Zhang, Y. He, and J. Luo, "Optimization of surface texture distribution on the thrust bearing using the mass-conserving cavitation boundary condition: Theory and experiments," *Tribology International*, vol. 194, p. 109551, 2024.
 - [9] J. Chu, S. Wu, J. Wang, Y. Wang, S. Wang, and F. Xu, "Analysis of gas foil thrust bearing considering manufacturing errors: Modeling and experiments," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 232, p. 112698, 2025.
 - [10] K. Pu, F. Yuan, P. Du, B. Huang, and D. Fei, "Study on influence of pad surface defects on lubrication characteristics of thrust bearing," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 203, p. 110492, 2024.