

ANALISIS *THERMOELASTO-HYDRODYNAMIC* PENGARUH PENGGUNAAN *BIOLUBRICANT* TERHADAP PERFORMA TRIBOLOGI PADA *JOURNAL BEARING*

*Vita Ayu Damayanti¹, 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: vitaayudmynt@gmail.com

Abstrak

Journal bearing merupakan komponen penting dalam sistem rotasi kecepatan tinggi yang kinerjanya sangat ditentukan oleh karakteristik pelumasan pada celah film fluida. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tekanan hidrodinamik dan deformasi *liner* sebagai representasi fenomena *thermoelasto-hydrodynamic* (TEHD) pada *double liner journal bearing* menggunakan pelumas *biolubricant* AWS-100 dan model turbulensi RNG $k-\epsilon$, melalui metode *two-way Fluid-Structure Interaction* (FSI). Konfigurasi geometri yang digunakan menerapkan rasio eksentrisitas $\epsilon = 0.7$, dengan simulasi pada kecepatan putar 4,000 hingga 8,000 RPM. Fenomena kavitasi pada celah film pelumas dimodelkan menggunakan pendekatan Zwart-Gerber-Belamri, dengan diskretisasi domain fluida dan domain padat menggunakan elemen *hexahedral*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pelumas AWS-100 menghasilkan tekanan hidrodinamik maksimum yang meningkat secara signifikan seiring kenaikan kecepatan putar, disertai kenaikan deformasi *liner* yang juga meningkat seiring kenaikan kecepatan putar pada rentang yang sama. Model turbulensi RNG $k-\epsilon$ menghasilkan tekanan maksimum yang relatif berdekatan dengan model turbulensi lain pada kecepatan rendah, dengan deformasi *liner* yang relatif paling rendah di antara model yang dibandingkan pada kecepatan tersebut, namun meningkat signifikan pada kecepatan putar tinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi pelumas maupun pemilihan model turbulensi memberikan pengaruh terhadap tekanan hidrodinamik dan deformasi *liner*, dengan pengaruh kecepatan putar yang dominan dan semakin signifikan pada kondisi operasi kecepatan tinggi.

Kata kunci: *biolubricant aws-100; journal bearing; rng k- ϵ ; thermoelasto-hydrodynamic*

Abstract

Journal bearing is an essential component in high-speed rotating systems, with its performance strongly governed by lubrication characteristics within the fluid film clearance. This study aims to analyze the hydrodynamic pressure and liner deformation as a representation of the thermoelasto-hydrodynamic (TEHD) phenomenon in a double liner journal bearing lubricated with AWS-100 biolubricant and modeled using the RNG $k-\epsilon$ turbulence model, through a two-way Fluid-Structure Interaction (FSI) method. The geometric configuration applies an eccentricity ratio of $\epsilon = 0.7$, with simulations conducted at rotational speeds ranging from 4,000 to 8,000 RPM. Cavitation in the lubricant film clearance was modeled using the Zwart-Gerber-Belamri approach, with the fluid and solid domains discretized using hexahedral elements. Simulation results show that AWS-100 produces a maximum hydrodynamic pressure that increases significantly with rotational speed, accompanied by a corresponding increase in liner deformation over the same speed range. The RNG $k-\epsilon$ turbulence model produces a maximum pressure relatively close to other turbulence models at low speed, with the lowest liner deformation among the compared models at that speed, before increasing markedly at high rotational speed. These results indicate that both lubricant variation and turbulence model selection influence the relationship between hydrodynamic pressure and liner deformation, with rotational speed exerting a dominant and increasingly significant influence under high-speed operating conditions.

Keywords : *biolubricant aws-100; journal bearing; rng k- ϵ ; thermoelasto-hydrodynamic*

1. Pendahuluan

Bearing merupakan komponen mekanik yang berfungsi menopang poros agar pergerakan rotasi berlangsung stabil dan minim gesekan.^[1] *Journal bearing* merupakan tipe yang paling umum digunakan pada sistem putaran kecepatan tinggi karena memanfaatkan film pelumas untuk menahan beban radial secara hidrodinamik melalui efek baji (*wedge effect*), namun kegagalannya dapat berdampak langsung pada downtime mesin industri.^[3,7,11] *Double liner journal bearing* menambahkan dua lapisan *liner* elastik untuk meningkatkan fleksibilitas deformasi dan redaman getaran.^[5,6] Pada kecepatan tinggi, aliran pelumas bertransisi menjadi turbulen yang memengaruhi distribusi tekanan dan kapasitas beban,

sehingga pemilihan model turbulensi menjadi aspek kritis dalam analisis numerik.^[2]

Fenomena *Thermoelasto-Hydrodynamic* (TEHD) mencakup interaksi multifisika antara fluida pelumas, medan panas, dan deformasi elastik yang berlangsung bersamaan, di mana karakteristik pelumas berpengaruh langsung terhadap distribusi tekanan, temperatur, dan kapasitas beban.^[13] *Biolubricant* AWS-100 dipilih sebagai pelumas alternatif ramah lingkungan (*Environmentally Acceptable Lubricant*) yang bersifat *biodegradable* dengan performa tribologis kompetitif terhadap pelumas konvensional.^[8,9] Pengaruh karakteristik pelumas terhadap distribusi tekanan dan ketebalan film pelumas telah dikaji secara numerik menggunakan pendekatan *thermo-hydrodynamic*.^[12] Model turbulensi RNG *k-ε* merupakan pengembangan model Standard *k-ε* berbasis teknik *renormalization group* yang mampu menangani efek pusaran (*swirl*) dan kelengkungan aliran pada celah film pelumas.^[10] Meskipun membutuhkan waktu komputasi lebih lama, model ini relevan untuk dikaji dalam konteks TEHD *double liner journal bearing*.^[4]

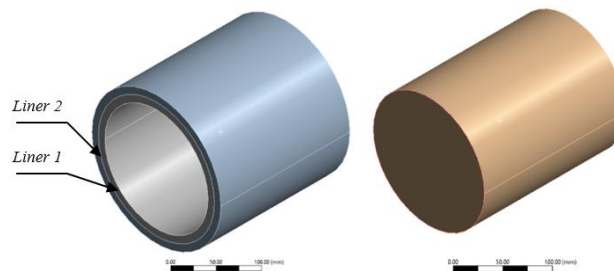
Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kecepatan putaran terhadap performa dan fenomena TEHD pada *double liner journal bearing* dengan menggunakan pelumas *biolubricant* AWS-100 dan model turbulensi RNG *k-ε*, pada rentang kecepatan putar 4,000 hingga 8,000 RPM dengan rasio eksentrisitas $\varepsilon = 0.7$.

2. Metode Penelitian

2.1 Geometri *Journal Bearing*

Geometri *journal bearing* yang digunakan dalam penelitian ini mengadopsi konfigurasi *sandwich liner bearing* dari Xie et al.^[14], terdiri atas dua domain utama, yaitu domain fluida (film pelumas) dan domain padat yang terdiri dari dua lapisan *liner* (*liner 1* berbahan Thordon dan *liner 2* berbahan rubber) serta housing *bearing*. Rasio eksentrisitas yang digunakan adalah $\varepsilon = 0.7$, dengan rentang kecepatan putar 4,000 hingga 8,000 RPM. Simulasi dilakukan menggunakan metode *two-way Fluid-Structure Interaction* (FSI) berbasis *thermal-fluid-solid coupling* pada perangkat lunak ANSYS 2020 R2, sehingga interaksi antara tekanan hidrodinamik, deformasi elastis *liner*, dan distribusi termal dapat dihitung secara simultan.

Parameter geometri model ini mencakup jari-jari *journal* sebesar 79.2 mm, jari-jari *liner 1* sebesar 90 mm, dan jari-jari *liner 2* sebesar 100 mm, dengan panjang *journal* 200 mm. *Radial clearance* yang digunakan adalah 0.8 mm dan *attitude angle* sebesar 45°.



Gambar 1. Konfigurasi *Double Liner Journal Bearing*

2.2 Pelumas *Biolubricant* AWS-100

Biolubricant AWS-100 merupakan pelumas berbasis hayati yang dikembangkan sebagai alternatif ramah lingkungan terhadap pelumas mineral konvensional. Pelumas ini bersifat *biodegradable* dengan toksisitas yang sangat rendah, serta menunjukkan perilaku viskositas yang relatif lebih stabil terhadap perubahan suhu dibandingkan pelumas mineral, sehingga menguntungkan pada kondisi operasi termal yang bervariasi. Dalam konteks *journal bearing*, AWS-100 menunjukkan koefisien gesek yang kompetitif terhadap pelumas mineral SAE 30, meskipun belum sepenuhnya menyamai performa pelumas sintetis. Karakteristik viskositas AWS-100 yang relatif tinggi menjadikannya kandidat menarik untuk dikaji secara mendalam pengaruhnya terhadap kapasitas dukung beban pada *double liner journal bearing*.

Secara umum, *biolubricant* jenis ini diformulasikan dari bahan dasar minyak nabati (*vegetable oil-based*) yang telah melalui proses modifikasi kimia, seperti epoksidasi atau esterifikasi, untuk memperbaiki stabilitas oksidasi dan performa pada suhu rendah yang menjadi kelemahan utama minyak nabati murni. Selain unggul dari sisi *biodegradability*, AWS-100 juga memiliki indeks viskositas (*viscosity index*) yang relatif tinggi, yang berarti perubahan viskositasnya terhadap fluktuasi suhu lebih kecil dibandingkan pelumas mineral, sehingga lapisan film pelumas yang dihasilkan lebih konsisten dalam menahan beban pada rentang kecepatan putar dan kondisi termal yang luas.

2.3 Model Turbulensi RNG *k-ε*

Model turbulensi *k-ε* merupakan model dua persamaan yang banyak digunakan dalam *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk mensimulasikan karakteristik aliran rata-rata pada kondisi turbulen, dengan viskositas turbulen μ_t dirumuskan sebagai fungsi dari energi kinetik turbulen (k) dan laju disipasi turbulen (ε).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

RNG *k-ε* (*Renormalization Group k-ε*) merupakan pengembangan dari model Standard *k-ε* yang diturunkan

menggunakan teknik statistik *renormalization group*. Model ini mampu menyelesaikan kasus aliran kompleks setara dengan model Realizable $k-\varepsilon$, meskipun pada praktiknya RNG $k-\varepsilon$ relatif jarang digunakan karena membutuhkan waktu komputasi yang lebih lama akibat sulitnya persamaan mencapai konvergensi. Persamaan transpor energi kinetik turbulen (k) dan laju disipasi (ε) yang digunakan dalam model ini adalah

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} \cdot P_b + S_\varepsilon$$

2.4 Variabel Penelitian

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah kecepatan putaran poros (2.000 RPM hingga 10.000 RPM) dengan menggunakan *biolubricant* AWS-100 dan model turbulensi RNG $k-\varepsilon$ secara tetap. Variabel terikat yang dianalisis dibatasi pada distribusi tekanan hidrodinamik dan deformasi *liner*, sebagai dua parameter yang merepresentasikan keterkaitan langsung antara respons fluida dan respons struktural pada fenomena TEHD.

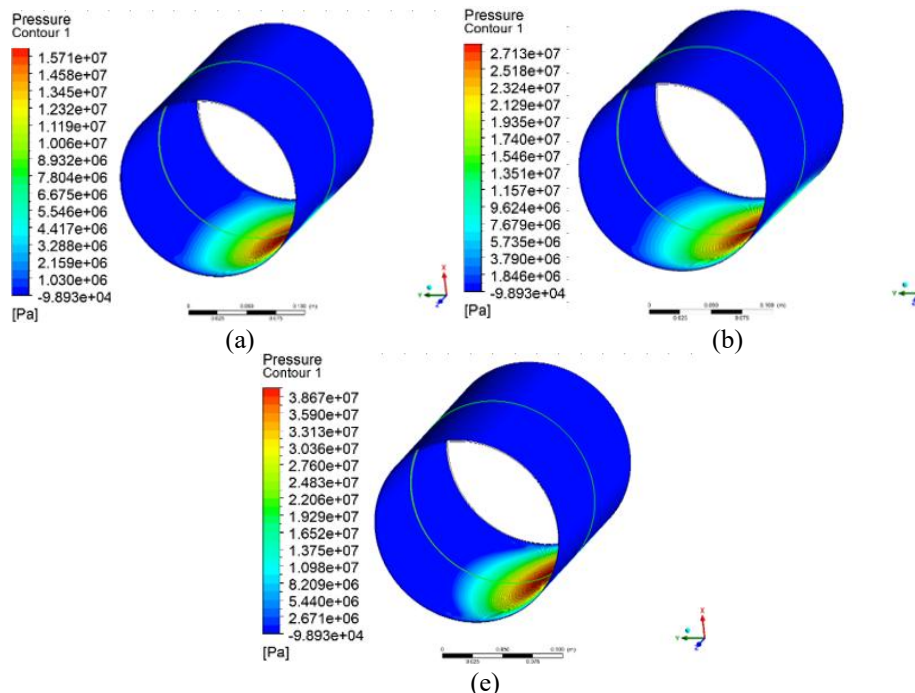
Untuk mengakomodasi fenomena kavitasi yang berpotensi terjadi pada zona divergen celah film pelumas akibat tekanan lokal yang turun di bawah tekanan uap fluida, simulasi ini menerapkan model kavitasi Zwart-Gerber-Belamri. Model ini dipilih karena mampu merepresentasikan proses pembentukan dan peluruhan fraksi uap (*vapor fraction*) secara lebih realistis melalui pendekatan laju perpindahan massa antara fase cair dan fase uap, sehingga distribusi tekanan pada zona divergen dapat disimulasikan dengan lebih akurat dibandingkan pendekatan tanpa model kavitasi.

Pada aspek diskretisasi domain, *meshing* untuk domain fluida (film pelumas) maupun domain padat (*liner* dan *housing*) menggunakan tipe elemen *hexahedral*. Pemilihan jenis mesh ini didasarkan pada kemampuannya menghasilkan kualitas elemen yang lebih baik serta tingkat akurasi numerik yang lebih tinggi pada domain dengan geometri silindris dan celah tipis seperti pada *journal bearing*, dibandingkan dengan elemen *tetrahedral*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Simulasi Tekanan Hidrodinamik

Distribusi tekanan hidrodinamik pada celah film pelumas dengan pelumas AWS-100 menggunakan model turbulensi RNG $k-\varepsilon$ menunjukkan pola yang konsisten di seluruh rentang kecepatan, yaitu tekanan mulai meningkat pada daerah konvergen, mencapai nilai puncak pada sekitar sudut 100°, kemudian menurun menuju zona divergen. Tekanan hidrodinamik maksimum meningkat secara signifikan seiring kenaikan kecepatan putar, mengindikasikan penguatan efek baji (*wedge effect*) yang semakin dominan akibat peningkatan kecepatan relatif antara permukaan poros dan film pelumas. Berikut Gambar 2 perbandingan kontur tekanan dengan *biolubricant* AWS 100 dengan kecepatan putar 4,000 – 8,000 RPM.



Gambar 21. Perbandingan Kontur Tekanan terhadap *Biolubricant* AWS 100 dengan *Thermo-elastohydrodynamic* (a) 4,000 RPM, (b) 6,000 RPM, dan (c) 8,000 RPM

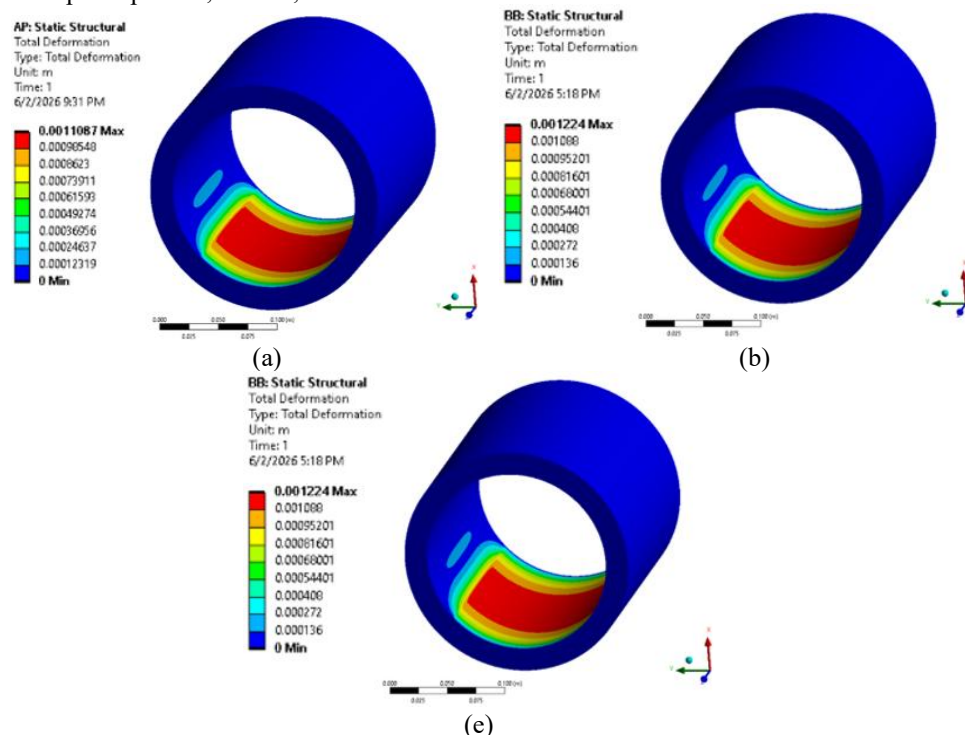
Dari hasil simulasi, terlihat bahwa luas area dengan tekanan tinggi (ditandai warna merah-oranye pada kontur) juga semakin meluas seiring kenaikan kecepatan putar. Pada kecepatan putar rendah, zona tekanan tinggi hanya terkonsentrasi pada area yang sempit di sekitar titik konvergen, sedangkan pada kecepatan putar tinggi, area tersebut tampak melebar dan mencakup sebagian lebih besar dari permukaan film pelumas. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putar tidak hanya memperbesar intensitas tekanan puncak, tetapi juga memperluas wilayah yang ikut menanggung beban hidrodinamik, sehingga distribusi gaya angkat menjadi lebih tersebar di sepanjang celah film pelumas.

Berbeda dengan perilaku pada zona konvergen, daerah divergen yang berasosiasi dengan tekanan rendah hingga sub-ambien menunjukkan karakteristik yang relatif stabil, baik dari segi nilai maupun luasannya, di seluruh variasi kecepatan putar yang dikaji. Stabilitas ini mengindikasikan bahwa pengaruh kecepatan putar terhadap pembentukan tekanan bersifat tidak simetris, yaitu lebih dominan memengaruhi mekanisme tekanan pada sisi konvergen dibandingkan sisi divergen. Dari perspektif keteknikan, temuan ini memberikan implikasi positif karena potensi kavitasi pada pelumas AWS-100 yang umumnya berasosiasi dengan tekanan sub-ambien di zona divergen tidak meningkat signifikan sejalan dengan kenaikan kecepatan putar, sehingga risiko degradasi performa pelumasan akibat kavitasi relatif dapat terkendali pada rentang kecepatan yang disimulasikan.

Secara umum, pola perubahan kontur tekanan terhadap variasi kecepatan putaran ini memperkuat pemahaman bahwa kinerja film pelumas AWS-100 dalam menghasilkan tekanan hidrodinamik penopang beban semakin meningkat pada kecepatan putar yang lebih tinggi. Namun demikian, perluasan zona bertekanan tinggi yang disertai peningkatan magnitudo tekanan secara signifikan perlu menjadi perhatian dalam konteks ketahanan struktural komponen bantalan, mengingat tegangan kontak yang diterima permukaan material berpotensi meningkat sejalan dengan intensitas dan luas area tekanan yang dihasilkan.

3.2 Hasil Simulasi Deformasi *Liner*

Sejalan dengan meningkatnya tekanan hidrodinamik, deformasi *liner* juga meningkat secara konsisten, dengan zona deformasi maksimum yang selalu terkonsentrasi pada daerah celah terkecil antara poros dan *liner*, yaitu lokasi yang sama dengan titik tekanan hidrodinamik tertinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa viskositas AWS-100 yang relatif tinggi tidak hanya menghasilkan kapasitas pembentukan tekanan yang besar, tetapi sekaligus memberikan beban struktural yang signifikan pada *liner*, sehingga keterkaitan antara respons fluida dan respons struktural perlu dipertimbangkan secara cermat dalam perancangan *bearing*, khususnya pada kondisi operasi kecepatan tinggi. Berdasarkan hasil simulasi selanjutnya, berikut Gambar 3 kontur perbandingan deformasi *liner* dengan *biolubricant* AWS 100 dengan kecepatan putar 4,000 – 8,000 RPM.



Gambar 3. Perbandingan Kontur Deformasi *Liner* terhadap *Biolubricant* AWS 100 dengan *Thermo-elastohydrodynamic* (a) 4,000 RPM, (b) 6,000 RPM, dan (c) 8,000 RPM

Hasil simulasi deformasi *liner* memperlihatkan bahwa nilai deformasi total mengalami peningkatan secara konsisten seiring dengan kenaikan kecepatan putar, sejalan dengan kenaikan tekanan hidrodinamik yang telah dibahas

sebelumnya. Pada kecepatan putar rendah, deformasi maksimum yang teramati masih relatif kecil, kemudian terus meningkat secara progresif pada setiap kenaikan RPM hingga mencapai nilai tertinggi pada kondisi kecepatan putar maksimum. Tren kenaikan ini menegaskan adanya hubungan yang erat antara distribusi tekanan fluida pada film pelumas dan respon deformasi struktural pada *liner*, di mana beban hidrodinamik yang lebih besar secara langsung diteruskan sebagai gaya tekan terhadap permukaan dalam *liner*.

Secara spasial, lokasi deformasi maksimum pada seluruh variasi kecepatan putar secara konsisten terletak pada zona yang sama, yaitu pada daerah celah terkecil antara poros dan *liner* (zona konvergen), yang juga merupakan titik dengan tekanan hidrodinamik tertinggi. Konsistensi lokasi ini memperkuat indikasi bahwa deformasi struktural pada *liner* murni merupakan respons langsung terhadap pembebanan tekanan fluida, bukan dipengaruhi oleh faktor geometris atau kondisi batas lain. Pada kontur deformasi, terlihat pula bahwa area dengan deformasi tinggi (ditandai warna merah hingga oranye) mengalami perluasan seiring kenaikan kecepatan putar, sejalan dengan meluasnya zona bertekanan tinggi pada hasil simulasi hidrodinamik, sehingga distribusi beban struktural pada *liner* menjadi lebih merata namun dengan magnitudo. Temuan ini memberikan implikasi penting dalam perancangan *bearing*, khususnya terkait pemilihan material dan ketebalan *liner* yang mampu menahan deformasi pada kondisi operasi kecepatan tinggi. Meskipun viskositas pelumas AWS-100 yang relatif tinggi menguntungkan dari sisi kapasitas dukung beban (*load carrying capacity*) karena menghasilkan tekanan hidrodinamik yang besar, kondisi ini secara bersamaan meningkatkan risiko deformasi struktural pada *liner* yang dapat memengaruhi celah operasional (*clearance*) antara poros dan *liner*. Oleh karena itu, keseimbangan antara kapasitas tekanan fluida dan kekuatan struktural komponen perlu menjadi pertimbangan utama agar kinerja *bearing* tetap optimal tanpa mengorbankan integritas struktural pada kecepatan putar tinggi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan terhadap pelumas biolubricant AWS-100 dan model turbulensi RNG $k-\epsilon$ pada double liner journal bearing, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Peningkatan kecepatan putar pada rentang 4,000 hingga 8,000 RPM menghasilkan kenaikan tekanan hidrodinamik maksimum secara konsisten pada *biolubricant* AWS-100, yang mengindikasikan semakin dominannya efek baji (*wedge effect*) akibat peningkatan kecepatan relatif antara permukaan poros dan film pelumas. Kenaikan tekanan ini sejalan dengan peningkatan deformasi *liner*, dengan lokasi deformasi maksimum yang selalu terkonsentrasi pada zona celah terkecil (konvergen) antara poros dan *liner* sama dengan lokasi tekanan hidrodinamik tertinggi sehingga menunjukkan keterkaitan langsung antara respons fluida dan respons struktural pada kondisi operasi kecepatan tinggi.
2. Pemilihan model turbulensi RNG $k-\epsilon$ memberikan hasil tekanan maksimum yang relatif sebanding dengan model turbulensi lain pada kecepatan putar rendah, namun menghasilkan deformasi *liner* yang relatif paling rendah di antara model yang dibandingkan pada kondisi tersebut, sebelum kemudian meningkat signifikan pada kecepatan putar tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa baik variasi jenis pelumas maupun pemilihan model turbulensi turut memengaruhi karakteristik tekanan hidrodinamik dan deformasi *liner*, dengan pengaruh kecepatan putar tetap menjadi faktor yang paling dominan dan semakin signifikan pada kondisi operasi kecepatan tinggi.

5. Daftar Pustaka

- [1] Lin, C., Jian, F., Sun, S., Sima, C., Qi, L., & Zou, M. (2023). Analysis of Nonlinear Time-Domain Lubrication Characteristics of the Hydrodynamic Journal Bearing System. *Lubricants*, 11(3), 145. <https://doi.org/10.3390/lubricants11030145>.
- [2] Feng, H., Jiang, S., & Ji, A. (2019). Investigations of the static and dynamic characteristics of water-lubricated hydrodynamic journal bearing considering turbulent, thermohydrodynamic and misaligned effects. *Tribology International*, 130, 245–260. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.09.007>.
- [3] Tauviqirrahman, M., Jamari, J., Wicaksono, A. A., Muchammad, M., Susilowati, S., Ngatilah, Y., & Pujiastuti, C. (2021). CFD Analysis of Journal Bearing with a Heterogeneous Rough/Smooth Surface. *Lubricants*, 9(9), 88. <https://doi.org/10.3390/lubricants9090088>.
- [4] Tauviqirrahman, M., Paryanto, P., Pugastri, B. O., Hamonangan, A. P., Muchammad, M., Yohana, E., & Jamari, J. (2023). CFD analysis of hydrodynamic journal bearing with Bingham plastic lubricant considering roughness. *Cogent Engineering*, 10(1), 2213537. <https://doi.org/10.1080/23311916.2023.2213537>.
- [5] Yang, Z., Zhang, X., Wang, Y., & Zhao, Y. (2023). Study on elastohydrodynamic lubrication performance of double-layer composite water-lubricated bearings. *Mechanics & Industry*, 24, 3. <https://doi.org/10.1051/meca/2022029>.
- [6] Xie, Z., Jiao, J., & Wrona, S. (2023). The fluid-structure interaction lubrication performances of a novel bearing: Experimental and numerical study. *Tribology International*, 179, 108151. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.108151>.
- [7] Dhanola, A., & Garg, H. C. (2020). Tribological challenges and advancements in wind turbine bearings: A review. *Engineering Failure Analysis*, 110, 104354. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104885>.

-
- [8] Nikolakopoulos, P. G., & Bompos, D. A. (2015). Experimental Measurements of Journal Bearing Friction Using Mineral, Synthetic, and Bio-Based Lubricants. *Lubricants*, 3(2), 155–163. <https://doi.org/10.3390/lubricants3020155>.
 - [9] Sadiq, M. I., Ghopa, W. A., Nuawi, M. Z., Rasani, M. R., & Ibrahim, S. (2022). An Experimental Investigation of Static Properties of Bio-Oils and SAE40 Oil in Journal Bearing Applications. *Materials*, 15(6), 2247. <https://doi.org/10.3390/ma15062247>.
 - [10] Yakhot, V., & Orszag, S. A. (1986). Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. *Journal of Scientific Computing*, 1(1), 3–51. <https://doi.org/10.1007/BF01061452>.
 - [11] Machado, T. H., & Cavalca, K. L. (2015). Modeling of hydrodynamic bearing wear in rotor-bearing systems. *Mechanics Research Communications*, 69, 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2015.05.008>.
 - [12] Tauviquirrahman, M., Afif, M. F., Paryanto, P., Jamari, J., & Caesarendra, W. (2021). Investigation of the Tribological Performance of Heterogeneous Slip/No-Slip Journal Bearing Considering Thermo-Hydrodynamic Effects. *Fluids*, 6(2), 48. <https://doi.org/10.3390/fluids6020048>.
 - [13] Abass, B. A., Ahmed, S. Y., & Kadhim, Z. H. (2023). Thermoelasto-hydrodynamic analysis of nano-lubricated journal bearings using computational fluid dynamics with two-way fluid–structure interaction considering cavitation. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(3), 2939–2950. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07024-9>.
 - [14] Xie Z, Jiao J, Wrona S, Wu X. Thermo-Elasto-Hydrodynamic (TEHD) analysis of water-lubricated double-layer journal bearing under high speed and heavy load. *Tribol Int* 2023;184:108428. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108428>.