

Numerical Analysis on the Effect of Slip Area Length on the Lubrication Performance of the Hydrophobic Journal Bearing

Mohammad Tauviquirrahman^{1,*}, Bayu Kurniawan¹ dan Jamari¹

¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro - Semarang

*Korespondensi: mohammad.tauviquirrahman@ft.undip.ac.id

Abstract. Lubrication of the journal bearing aims to prevent the contact between surfaces so that wear can be prevented. In order to improve the lubrication performance, a hydrophobic journal bearing design is introduced. In such bearing, the hydrophobic coating is applied in one of the contact surfaces. In the present study, the length of the slip area (hydrophobic) applied to the stationary surface is of particular interest with respect to the lubrication performance. In addition, the operational loading of journal bearing is also varied. The lubrication is modelled using the modified Reynolds equation. This equation is then discretized using the finite volume method and solved using TDMA (Tri-Diagonal-Matrix-Algorithm) and ADI (Alternating-Direction-Implicit). The numerical experiments show that for certain loads, the slippage greatly affects the predicted minimum film thickness. The provision of slip can increase and decrease the minimum film thickness depending on the length of the slip area. In this way, the choice of slip area length in the journal bearing must be done carefully. However, when compared with conventional journal bearing, the friction coefficient of the hydrophobic journal bearing is much lower. The result of this study can be used as a first step to increase the life time of journal bearing.

Abstrak. Pelumasan pada *journal bearing* bertujuan untuk mencegah terjadinya kontak antar permukaan sehingga keausan dapat dicegah. Untuk meningkatkan performansi pelumasan, desain *hydrophobic journal bearing* diperkenalkan yang mana salah satu permukaan kontaknya diberi pelapis *hydrophobic* yang memiliki sifat slip (anti-air). Pada penelitian kali ini, panjang daerah slip (*hydrophobic*) yang diaplikasikan pada permukaan diam *journal bearing* (bagian *housing*) divariasikan untuk diketahui mana yang paling mungkin bisa menghasilkan peningkatan performansi pelumasan maksimal dibanding dengan *conventional journal bearing*. Selain itu, beban operasional *journal bearing* juga divariasikan. Analisis pelumasan dilakukan dengan menggunakan persamaan Reynolds yang sudah dimodifikasi. Persamaan ini kemudian didiskretisasi dengan menggunakan pendekatan volume hingga dan dipecahkan dengan menggunakan algoritma TDMA (*Tri-Diagonal-Matrix-Algorithm*) dan metode ADI (*Alternating-Direction-Implicit*). Hasil eksperimen numerik menunjukkan bahwa untuk beban tertentu, pemberian slip sangat berpengaruh terhadap prediksi ketebalan film minimum. Adanya pemberian slip bisa meningkatkan serta menurunkan ketebalan film minimum tergantung panjang daerah slip sehingga pemilihan panjang daerah slip pada *journal bearing* mesti dilakukan secara seksama. Meskipun demikian, jika dibandingkan dengan *conventional journal bearing*, koefisien gesek yang terjadi pada *hydrophobic journal bearing* jauh lebih rendah. Hasil penelitian kali ini dapat dijadikan sebagai langkah awal untuk meningkatkan umur pakai *journal bearing*.

Kata kunci: journal bearing, hydrophobic, metode volume hingga, pelumasan, slip

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Bantalan (*bearing*) merupakan salah satu komponen penting yang terdapat pada mesin yang berfungsi untuk menahan elemen mesin yang berputar. Bantalan digunakan sebagai pemisah sebuah sumbu poros pada mesin agar tidak terjadi kontak antara poros dan penumpunya. Bantalan berfungsi juga menjaga agar poros dapat berputar dengan baik. Salah satu jenis bantalan yang menggunakan fluida sebagai pelumas antar permukaan kontak adalah *journal bearing*. Jenis bantalan ini merupakan bantalan yang menahan beban yang bekerja pada poros [1]. Pelumas digunakan untuk

memberikan gaya internal yang disebut dengan daya dukung beban. Daya dukung beban didefinisikan sebagai integrasi tekanan hidrodinamik di sepanjang permukaan bantalan.

Seiring dengan perkembangan teknologi pengukuran, saat ini telah ditemukan bahwa fenomena slip terjadi pada aliran baik skala mikro maupun makro. Slip terbukti dapat mengurangi gaya gesek sehingga dapat dimanfaatkan untuk membuat *journal bearing* dengan gaya gesek rendah [2-5]. Meskipun demikian, jika memilih daerah slip secara seragam, maka akan cenderung mengurangi daya dukung pelumasan dalam kontak terlumasi [6-8]. Dari segi proses

manufaktur, slip ini dihasilkan dari pelapisan *hydrophobic*. Karena itulah, adopsi karakteristik slip ke permukaan kontak dalam *journal bearing* (selanjutnya dinamakan sebagai *hydrophobic journal bearing*) menjadi suatu terobosan untuk meningkatkan performansi *journal bearing* dan pada akhirnya memperpanjang umur pakai *journal bearing*.

Atas dasar *main-frame* inilah dalam penelitian ini, performansi pelumasan *hydrophobic journal bearing* akan diteliti lebih lanjut terkait dengan pengaruh panjang daerah pelapisan *hydrophobic* yang memberikan efek slip terhadap ketebalan film dan *power loss*. Beban eksternal yang bekerja pada poros *journal bearing* juga akan divariasi.

Analisis

Pemodelan slip. Ketersediaan pelapis berjenis *hydrophobic* memungkinkan untuk memodifikasi komponen *bearing* agar memiliki performansi sesuai dengan yang diinginkan. Penerapan *hydrophobic* ini menyebabkan pelumas akan mengalami slip pada permukaan *bearing*. Kondisi ini terbukti dapat menurunkan gaya gesekan yang telah dibuktikan baik secara numerik [4] maupun eksperimen [6, 8]. Ketika pelumas mengalami slip di sepanjang permukaan *solid-liquid*, panjang slip β sebagai ukuran tingkat slip suatu pelumas dinyatakan dengan hubungan sebagai berikut:

$$u_s = \beta \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{\text{permukaan}} \quad (1)$$

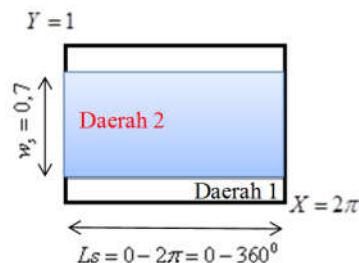
dimana u_s mengindikasikan kecepatan slip pada permukaan *hydrophobic*, β panjang slip, dan $\partial u / \partial z|_{\text{surface}}$ sebagai laju geser permukaan. Dari beberapa penelitian terdahulu bahwa semakin besar β , semakin besar slip. Selain itu, dibuktikan pula bahwa modifikasi permukaan secara kimiawi dapat menghasilkan panjang slip dalam order sebesar 1 μm [9], sedangkan melalui kombinasi penteksturan permukaan dengan pemberian *hydrophobic* (slip), panjang slip sampai sebesar 100 μm dapat diperoleh [9]. Dalam penelitian ini, panjang slip pada permukaan *hydrophobic* diasumsikan seragam dengan β sebesar 1 μm .

Persamaan umum. Persamaan yang digunakan adalah persamaan modifikasi Reynolds yang di-deskretisasi dengan menggunakan metode volume hingga. Persamaan tersebut mengasumsikan slip terjadi pada permukaan. Kondisi *steady* dan pemecahan dalam arah dua dimensi (x dan z) juga digunakan. Persamaan modifikasi Reynolds diekspresikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \left(1 + \frac{3\alpha\eta}{h + \alpha\eta} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \left(1 + \frac{3\alpha\eta}{h + \alpha\eta} \right) \right) \\ &= 6\eta u_w h \frac{\partial}{\partial x} \left(1 + \frac{\alpha\eta}{h + \alpha\eta} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

Arti fisik simbol-simbol dalam persamaan (2) adalah sebagai berikut: h ketebalan film, p tekanan hidrodinamik, α koefisien slip pada permukaan diam, u_w = kecepatan sliding dan η viskositas pelumas.

Spesifikasi model. Gambar 1 menunjukkan skema representasi *journal bearing* yang menjadi bahan kajian. Dalam penelitian ini, slip diletakkan secara parsial di daerah masuk kontak permukaan di bagian *housing* pada bagian *journal bearing*. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan daya dukung beban maksimal pada *bearing* [8]. Dalam penelitian, lebar daerah slip w_s diasumsikan konstan sebesar 0.7 lebar total *bearing*. Tabel 1 menyajikan geometri dan kondisi operasional *journal bearing*.



Gambar 1. Skema representasi *journal bearing* dengan slip

Tabel 1. Spesifikasi geometri dan kondisi operasional

Parameter	Nilai	Satuan
Putaran operasi	5.100	rpm
Radius journal	209,7	mm
Radius bearing	210,25	mm
<i>Clearence radius</i>	0,55	mm
Panjang bearing	535,6	mm
Viskositas pelumas	0,02785	Pa.s
Beban operasional	700; 1.400; 2.190	kN

Dalam penelitian ini, akan dicari pengaruh panjang daerah *slip* terhadap ketebalan film minimum dan *power loss* yang terjadi sehingga dapat diketahui daerah maksimal pemberian slip. *Power loss* adalah daya yang hilang akibat adanya gesekan. Semakin besar gesekan yang terjadi maka akan semakin banyak daya yang hilang (berupa panas). *Power loss* P_l dirumuskan dengan:

$$P_l = f W R \omega \quad (3)$$

dimana f adalah koefisien gesek, W adalah beban *bearing*, R adalah radius *sleeve*, dan ω adalah kecepatan *journal*. Sedangkan prediksi ketebalan film minimal h_{min} pada *journal bearing* dapat diperoleh dari persamaan berikut:

$$h_{min} = c (1 - \varepsilon) \quad (4)$$

dimana c adalah *radial clearance*, dan ε = rasio eksentrisitas. Pada kisaran dimana ketebalan film menurun pada arah rotasi poros, tekanan positif terjadi pada film pelumas karena adanya putaran poros (efek *wedge*), dan akan memberikan gaya dukung pada poros.

Dalam penelitian ini, beban yang digunakan antara lain adalah beban ketika terjadi tekanan kritis (2,190 kN), beban menengah (1,400 kN) dan beban rendah (700 kN), seperti tersaji dalam Tabel 1. Pemvariasian dilakukan untuk mengetahui kecenderungan pengaruh *slip* pada tingkat beban yang berbeda-beda.

Diskretisasi. Untuk memecahkan masalah, persamaan Reynolds modifikasi dipecahkan secara numerik dengan menggunakan metode beda hingga. Asumsi yang digunakan keseluruhan domain komputasi adalah pelumasan hidrodinamik. Dengan menerapkan skema diskretisasi, domain komputasi terbagi ke sejumlah volum-volum kecil. Mesh yang digunakan berukuran 40×40 , yang diperoleh melalui studi grid independen. Solusi hasil diskretisasi persamaan Reynolds dipecahkan dengan menggunakan algoritma *tridiagonal matrix*, yang digabungkan dengan *alternating direction method*.

Hasil dan Pembahasan

Conventional bearing pada tulisan ini mengacu pada *journal bearing* tanpa efek slip. Dengan kata lain, semua material yang digunakan bersifat *oleophilic*. Dalam pelumasan *conventional bearing*, rasio eksentrisitas harus tidak boleh sama dengan nol untuk mendapatkan daya dukung beban sehingga pelumasan bisa berjalan secara efektif.

Dalam penelitian ini, performansi pelumasan *hydrophobic journal bearing* diperbandingkan dengan *conventional bearing* untuk berbagai variasi beban operasional. Ada tiga variasi beban operasional *bearing* yang akan disimulasikan untuk mendapatkan prediksi ketebalan film pelumas, yaitu 700 kN, 1400 kN dan 2190 kN. Untuk beberapa variasi pembebanan, berikut adalah hasil perhitungan *bearing* konvensional untuk beberapa rasio eksentrisitas adalah

- Pada beban 700 kN, didapatkan rasio eksentrisitas ε sebesar 0,49, ketebalan film minimum h_m sebesar 0,280 mm, dan *power loss* (P_l) sebesar 102,63 kW.

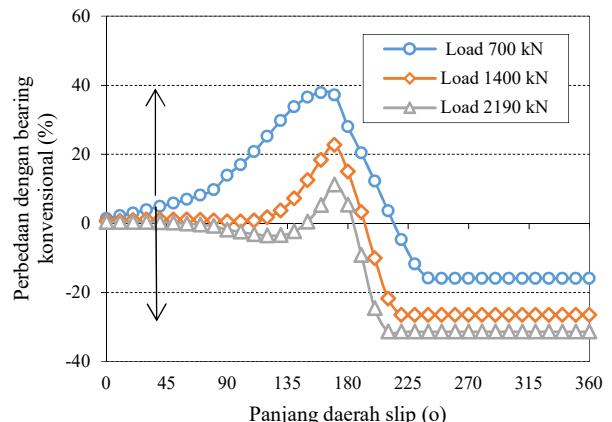
- Pada beban 1.400 kN, rasio eksentrisitas ε yang terjadi sebesar 0,686, ketebalan film minimum h_m sebesar 0,173 mm dan *power loss* (P_l) sebesar 144,99 kW.
- Pada beban 2.190 kN, rasio eksentrisitas ε yang terjadi sebesar 0,782, ketebalan film minimum $h_m = 0,120$ mm dan *power loss* (P_l) sebesar 188,06 kW.

Dari perhitungan ini, tampak bahwa pada *conventional bearing* semakin besar beban operasi, semakin kecil nilai h_m dan ini akan membuat *power loss* bertambah besar.

Gambar 2 menyajikan pengaruh panjang daerah slip terhadap performansi *journal bearing* terkait dengan ketebalan film. Performansi *hydrophobic journal bearing* ini dibandingkan dengan *conventional journal bearing* disajikan dalam sebuah prosentasi seperti terlihat dalam Gambar 2 ini untuk berbagai variasi beban operasional *bearing*.

Dari gambar 2 terlihat bahwa dengan adanya pemberian daerah slip bisa meningkatkan serta menurunkan ketebalan film minimum. Dengan pemberian daerah slip yang tepat maka bisa meningkatkan ketebalan film. Untuk beban tinggi (2.190 kN) terlihat pemberian slip akan menghasilkan kenaikan ketebalan film yang cukup signifikan pada daerah antara 150-170°, dengan titik maksimal berada pada titik 170° dengan kenaikan mencapai 11,2% dibandingkan dengan *bearing* konvensional.

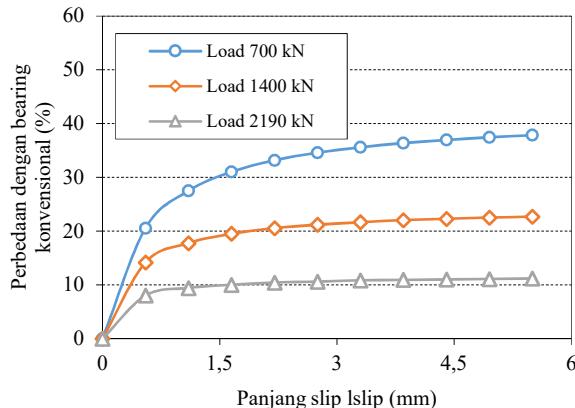
Untuk beban menengah (1.400 kN) terlihat bahwa pemberian slip selalu meningkatkan ketebalan film dari daerah 0-190°. Kenaikan yang signifikan mulai terjadi pada daerah pada 120°, dengan titik maksimal berada pada titik 170° dengan kenaikan mencapai hampir 22,7% dibandingkan dengan *conventional bearing*. Untuk beban rendah (700 kN) efek pemberian slip akan selalu menghasilkan kenaikan yang signifikan mulai dari daerah 0-210°, dengan titik maksimal berada pada titik 160° dengan kenaikan mencapai 37,8% dibandingkan dengan *conventional bearing*.



Gambar 2. Grafik pengaruh panjang daerah *slip* terhadap ketebalan film

Dari gambar 2 terlihat bahwa pemberian slip akan menghasilkan efek negatif pada prediksi ketebalan film yang dihasilkan pada daerah setelah 190° , yaitu daerah divergen dimana kavitasi sangat mungkin terjadi. Terlihat juga bahwa semakin besar beban maka keuntungan dengan pemberian efek slip akan semakin menurun. Hal ini sesuai dengan hasil yang dinyatakan oleh Fortier dan Salant [10].

Efek slip secara komersial bisa dihasilkan dengan cara melapisi permukaan *bearing* dengan pelapis *hydrophobic*. Tingkat slip pada pelapis ini tergantung dari nilai panjang slip β (seperti terlihat dalam persamaan 1) yang dimiliki oleh pelapis *hydrophobic* ini.



Gambar 3. Grafik pengaruh panjang slip terhadap ketebalan film

Gambar 3 menyajikan korelasi antara panjang slip β sebagai tingkat *hydrophobicity* suatu permukaan dengan performansi *hydrophobic journal bearing*. Terlihat bahwa jika dibandingkan dengan performansi *conventional journal bearing*, *hydrophobic journal bearing* memberikan performansi yang lebih baik untuk semua beban operasi. Untuk tiap beban operasional, ada suatu harga panjang slip optimal $l_{\text{slip_opt}}$ yang sama, yaitu pada kisaran 4 mm.

Artinya, ketika tingkat *hydrophobicity* dinaikkan lagi, performansi *hydrophobic journal bearing* tidak akan banyak berubah. Dari gambar 3 terlihat pula bahwa semakin besar beban, semakin berkurang keuntungan pemberian slip terhadap ketebalan film. Hal ini dapat dimaklumi karena daya dukung beban yang dihasilkan oleh pelumas dan fenomena slip tidak cukup kuat untuk mengimbangi beban eksternal yang besar.

Kesimpulan

Dalam penelitian ini, pengaruh pemberian slip sebagai modifikasi permukaan *bearing* terhadap performansi pelumasan diinvestigasi. Dua jenis *journal bearing*, yakni *conventional* dan *hydrophobic*, diperbandingkan performansi pelumasannya (*power loss* dan ketebalan film minimal). Dari

hasil analisa yang telah dibahas, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Secara umum, *hydrophobic journal bearing* memiliki performansi pelumasan yang lebih baik jika dibandingkan dengan *conventional journal bearing*. Koefisien gesek yang terjadi pada *hydrophobic journal bearing* jauh lebih rendah dibanding *conventional journal bearing*.
- Pemberian slip pada *hydrophobic journal bearing* sangat berpengaruh terhadap prediksi ketebalan film minimum tergantung panjang daerah slip. Karena itu, panjang daerah slip pada permukaan *bearing* mesti dilakukan dengan tepat.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi panduan ketika melakukan proses perancangan dan analisa *journal bearing* demi mendapatkan performa pelumasan yang lebih baik dan umur pakai yang lebih lama.

Referensi

- [1] Hori, Y., 2006. Hydrodynamic Lubrication. Springer-Verlag, Tokyo.
- [2] Pit, R., Hervet, H. and Leger, L., 1999. Friction and slip of a simple liquid at a solid surface, Tribol. Lett. 7, 147–152.
- [3] Tretheway, D.C. and Meinhart, C.D., 2002. Apparent fluid slip at hydrophobic micro-channel walls, Phys. Fluids 14, 9–12.
- [4] Zhu, Y. and Granick, S., 2001. Rate-dependent slip of Newtonian liquid at smooth surfaces, Phys. Rev. Lett. 87, 096105.
- [5] Cottin-Bizonne, C., Barentin, C., Charlaix, E., Bocquet, L., Barrat, J.L., 2004. Dynamics of simple liquids at heterogeneous surfaces: Molecular-dynamics simulations and hydrodynamic description, Eur. Phys. J. E. 15, 427–438.
- [6] Ma, G.J., Wu, C.W., Zhou, P., 2007. Influence of wall slip on the hydrodynamic behavior of a two-dimensional slider bearing, Acta Mech. Sin. Xuebao 23, 655–661.
- [7] Wu, C.W. and Sun, H.X., 2006. Quadratic programming algorithm for wall slip and free boundary pressure condition, Int. J. Numer. Methods Fluids 50, 131–145.
- [8] Tauviquirrahman, M., Ismail, R., Jamari, Schipper, D.J., 2013. Optimization of the complex slip surface and its effect on the hydrodynamic performance of 2D lubricated contacts, Comput. Fluids 79, 27–43.

- [9] Choo, J.H., Spikes, H.A., Ratoi, M., Glovnea, R., Forrest, A., 2007. Friction reduction in low-load hydrodynamic lubrication with a hydrophobic surface, *Tribol. Int.* 40, 154–159.
- [10] Fortier, A.E. and Salant, R.F., 2005. Numerical analysis of a journal bearing with a heterogeneous slip/no-slip surfaces, *ASME J. Tribol.* 127, 820-825.