
APLIKASI SLIP UNTUK MENGURANGI GESEKAN PADA BANTALAN

M. Tauviquirrahman,¹⁾ R. Ismail,¹⁾ Jamari,²⁾ dan D.J. Schipper¹⁾

¹⁾ Laboratory for Surface Technology and Tribology,
Faculty of Engineering Technology, University of Twente
Drienerloolaan 5, Postbus 217, 7500 AE, Enschede, The Netherlands

²⁾ Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedharto, UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia, Telepon: 024-7460059
e-mail: mtauviq99@yahoo.com

Abstrak

Prediksi perilaku bantalan tergantung kepada kondisi batas antarmuka antara pelumas dan permukaan dinding bantalan. Banyak penelitian saat ini yang menunjukkan bahwa fenomena slip pada permukaan terbukti terjadi. Untuk aplikasi slip yang sengaja direkayasa terjadi pada suatu permukaan kontak untuk tujuan meningkatkan performansi bantalan juga telah mendapat banyak perhatian dari peneliti. Permukaan semacam itu dapat dibuat dengan menerapkan sifat hydrophobic dan diprediksi mampu mengurangi gesekan.

Tujuan penelitian ini adalah membuktikan secara numerik hipotesa bahwa slip mampu mengurangi gesekan dengan cara mengatur permukaan bersifat heterogen, yaitu slip memenuhi sebagian permukaan dan sisanya dikondisikan tidak terjadi slip. Persamaan Reynolds termodifikasi dengan slip dipecahkan dengan metode volume hingga.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa permukaan slip heterogen mampu memberikan performansi pelumasan yang lebih baik jika dibandingkan dengan permukaan tanpa-slip. Bahkan pada gap yang sejajar pun, analisa menunjukkan bahwa distribusi tekanan dapat mencapai harga yang maksimum, sementara dengan kondisi batas tanpa-slip, tekanan yang dihasilkan adalah nol. Penemuan ini sekaligus mendobrak teori klasik Reynolds bahwa hanya gap yang konvergen saja yang mampu memberikan daya dukung beban pada bantalan. Pengurangan gesekan maksimum terjadi ketika panjang daerah slip berada pada kisaran 0.60 dari keseluruhan panjang bantalan. Gesekan berkurang 16 % - 23 % tergantung pada panjang slip dalam permukaan heterogen.

Kata kunci: *hydrophobic, gesekan, pelumasan, slip*

PENDAHULUAN

Sejak lama telah diketahui bahwa terdapat konsep dalam teori pelumasan Reynolds klasik yang mengasumsikan bahwa tidak ada slip yang terjadi di antara permukaan dinding dan pelumas (Reynolds, 1886). Hal ini disebut dengan kondisi batas tanpa-slip. Asumsi ini telah sukses diterapkan dalam masalah-masalah kerekayasaan. Meskipun demikian, asumsi ini sudah tidak lagi akurat, khususnya pada skala mikroskopik. Selama beberapa dekade terakhir, bukti keberadaan slip pada antarmuka liquid-solid telah dilaporkan oleh beberapa peneliti. Dengan kemajuan teknologi pengukuran skala mikro dan nano, saat ini sangat mungkin bagi ilmuwan untuk mengamati slip dinding dalam skala nano-meter (Thompson dan Troian, 1997, Pit dkk, 2000, Craig dkk, 2001, Bonaccorso dkk, 2002 & 2003). Slip dinding ditemukan tidak hanya pada permukaan *hydrophobic* (Craig dkk, 2001, Bonaccorso dkk, 2003), tetapi juga pada permukaan *hydrophilic* (Bonaccorso dkk, 2002). Selain itu, slip dinding ternyata juga ada dalam fluida non-Newtonian (Ellahi, 2009) dan Newtonian (Craig dkk, 2001). Oleh karena itu, bukti adanya slip secara umum diterima dan untuk kasus-kasus tertentu kondisi batas tanpa-slip menjadi tidak valid.

Slip dinding biasanya dimodelkan dengan *slip length model* pada laju geser rendah dan *critical shear stress model* pada laju geser tinggi. Dapat dikatakan bahwa tingkat derajat slip tergantung dengan laju geser. Model yang paling sering digunakan adalah *slip length model*. Model ini pertama kali diajukan oleh Navier (1823) dan dinyatakan bahwa kecepatan slip berbanding lurus dengan laju geser liquid yang terjadi pada antarmuka. *Slip length model* menggunakan suatu parameter panjang, yang disebut dengan panjang slip, untuk memprediksi kecepatan slip, yang ditulis sebagai: $V_s = \alpha \dot{\gamma}$ dimana V_s adalah kecepatan slip, α panjang slip yang nilainya tetap untuk antarmuka yang sama dan $\dot{\gamma}$ adalah laju geser lokal. Kondisi batas dievaluasi pada permukaan. Panjang slip merupakan jarak di bawah antarmuka yang mana kecepatan liquid diekstrapolasi ke harga nol.

Tulisan ini menyajikan penggunaan slip dinding yang direayasa terjadi pada salah satu permukaan kontak pada bantalan untuk menghasilkan gesekan yang lebih rendah. Prosedur pengurangan gesekan hidrodinamik dalam bantalan akan dijelaskan. Slip dinding dan hidrodinamika dalam pelumasan pada bantalan dijelaskan secara numerik. *Slip length model* dipilih dalam simulasi kali ini.

MODEL MATEMATIK

Gambar 1 menyajikan skema bantalan dengan pola slip heterogen. Permukaan bawah tanpa slip bergerak dengan kecepatan u_x . Permukaan atas yang terdiri dari dua zona permukaan dengan *property* slip yang berbeda dibuat tidak bergerak. Sisi bagian kirinya (x berkisar dari 0 sampai S_x), diberi slip. Sementara sisanya, dibuat kondisi tanpa slip.

Aliran pelumas di antara dua permukaan dimodelkan dengan menggunakan persamaan Reynolds termodifikasi, dengan memasukkan parameter slip. Persamaan ini ditulis sebagai berikut:

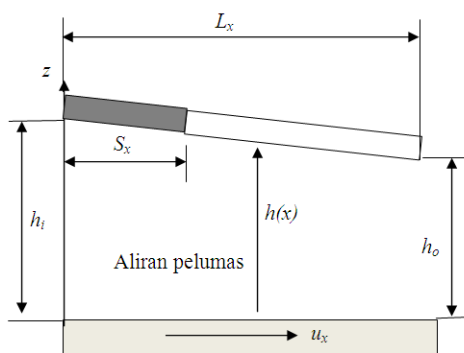
$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \left(1 + \frac{3\alpha\eta}{h + \alpha\eta} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \left(1 + \frac{3\alpha\eta}{h + \alpha\eta} \right) \right\} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{u_x h}{2} \left(1 + \frac{\alpha\eta}{h + \alpha\eta} \right) \right\} \quad (1)$$

dimana p adalah tekanan lokal, α adalah panjang slip, η adalah viskositas, dan h adalah ketebalan film lokal. Persamaan Reynolds termodifikasi didiskretisasi dengan menggunakan metode volume hingga dan dipecahkan dengan menggunakan *alternating direction implicit method* (ADI). Sebagai bahan catatan adalah jika α , diatur ke harga nol, maka Persamaan (1) berkurang menjadi persamaan Reynolds klasik (tanpa-slip).

Perhitungan gesekan ditentukan dengan cara mengintegrasikan tegangan geser pada permukaan bawah. Tegangan geser untuk daerah slip didefinisikan sebagai:

$$\tau = -\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \left\{ \frac{h + 2\alpha\eta}{h + \alpha\eta} \right\} - \frac{\eta u_x}{h + \alpha\eta} \quad (2)$$

Dengan cara mengatur panjang slip α ke angka nol, Persamaan (2) dapat digunakan untuk menghitung gesekan pada daerah tanpa-slip.



Gambar 1. Skema dua permukaan kontak bantalan dengan kondisi batas heterogen.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini terbagi menjadi dua bagian pembahasan. Pertama, pembahasan tentang kondisi pelumasan tanpa slip yang berarti bahwa untuk proses perancangan maupun analisa pelumasan hidrodinamika pada bantalan asumsi tidak terjadi slip digunakan dan persamaan Reynolds kalsik digunakan. Kedua, pelumasan pada bantalan dengan kondisi slip. Salah satu permukaan kontak pada bantalan (permukaan yang diam) disengaja dibuat bersifat *hydrophobic* agar terjadi slip. Untuk menciptakan pola heterogen slip, sifat *hydrophobic* ini hanya diterapkan pada sebagian permukaan diam, tidak seluruhnya. Pada penelitian ini, pola heterogen yang digunakan adalah bahwa daerah slip diterapkan sebesar 0.6 dari panjang keseluruhan bantalan dan diletakkan di daerah *input* berdasarkan kerja Wu dkk (2006). Secara praktis sifat *hydrophobic* dapat

dibuat dengan menggunakan teknologi etsa maupun pelapisan atau gabungan keduanya. Intinya permukaan yang dikehendaki terjadi slip mesti diperlakukan secara fisik dan kimiawi.

Kondisi Tanpa-Slip

Untuk memvalidasi skema numerik dengan menggunakan *alternating direction implicit method* (ADI) dalam *tridiagonal matrix algorithm* (TDMA), persamaan Reynolds klasik (tanpa-slip) dipecahkan secara numerik untuk menghitung distribusi tekanan, dan gesekan pada bantalan. Hasil-hasil ini selanjutnya diperbandingkan dengan solusi analitik berdasarkan kerja Cameron (1966) sebagai berikut :

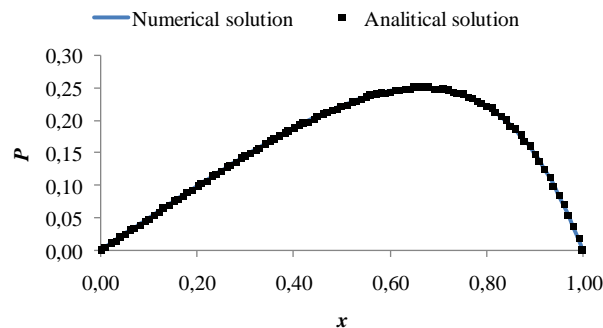
$$p = \frac{6u_x \eta L_x}{h_o^2} \frac{K \frac{x}{L_x} \left(1 - \frac{x}{L_x}\right)}{(2 + K) \left(1 + K - K \frac{x}{L_x}\right)^2} \quad (4)$$

untuk menghitung distribusi tekanan dimana K didefinisikan sebagai $(h_i - h_o) - 1$.

$$f = \frac{L_x \eta u_x}{h_o} \left(\frac{4 \ln(1 + K)}{K} - \frac{6}{(2 + K)} \right) \quad (5)$$

untuk menghitung gesekan persatuan lebar.

Pada Gambar 2 hasil-hasil numerik untuk tekanan tak berdimensi yang dihasilkan oleh fluida diperoleh dengan menggunakan metode numerik dengan metode ADI dan TDMA dan selanjutnya dibandingkan dengan solusi analitik (Persamaan 4 dan 5). Kesesuaian yang sangat baik diperoleh antara hasil numerik dan analitik. Perbedaan tersebut kurang dari 1 %.



Gambar 2. Distribusi tekanan yang dinormalisasi sepanjang dinding dengan kondisi batas *no-slip*

Perbandingan antar gaya gesek tak berdimensi ($F = fh_o / \eta L_x u_x$ dimana f adalah gaya gesek per satuan lebar) antara hasil numerik dengan hasil analitik disajikan dalam Tabel 1. Seperti halnya distribusi tekanan, prediksi gesekan menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan solusi analitik. Oleh karena itu, metode numerik yang dikembangkan (metode ADI yang dikombinasikan dengan TDMA) dapat digunakan untuk mensimulasikan dan memecahkan persamaan Reynolds modifikasi dengan kondisi slip dinding.

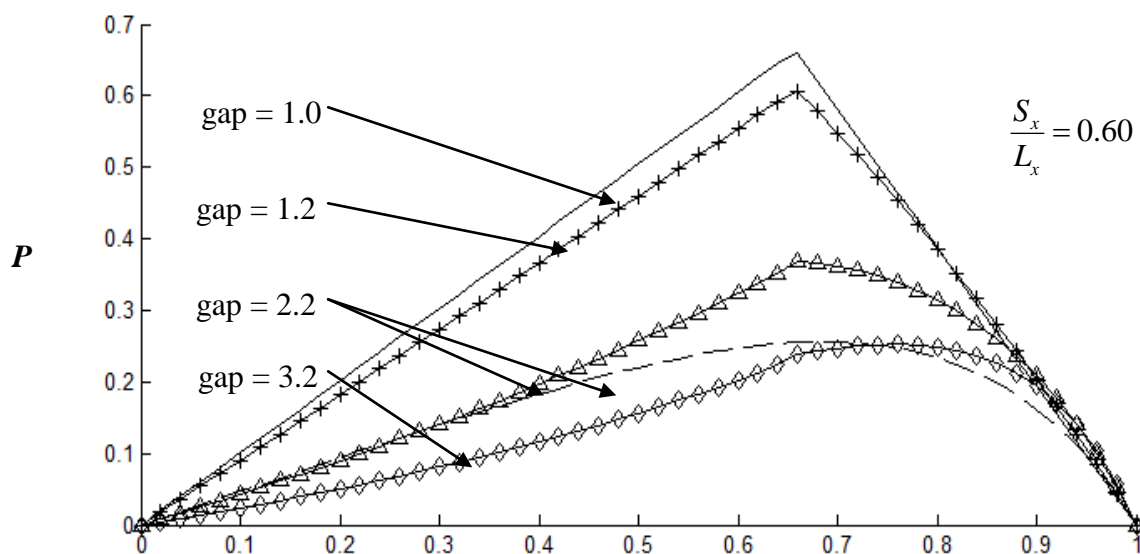
Tabel 1. Perbandingan antara solusi numerik dengan solusi analitik untuk prediksi gesekan

	Gesekan tak berdimensi, F
Solusi analitik	0.77
Prediksi numerik	0.77

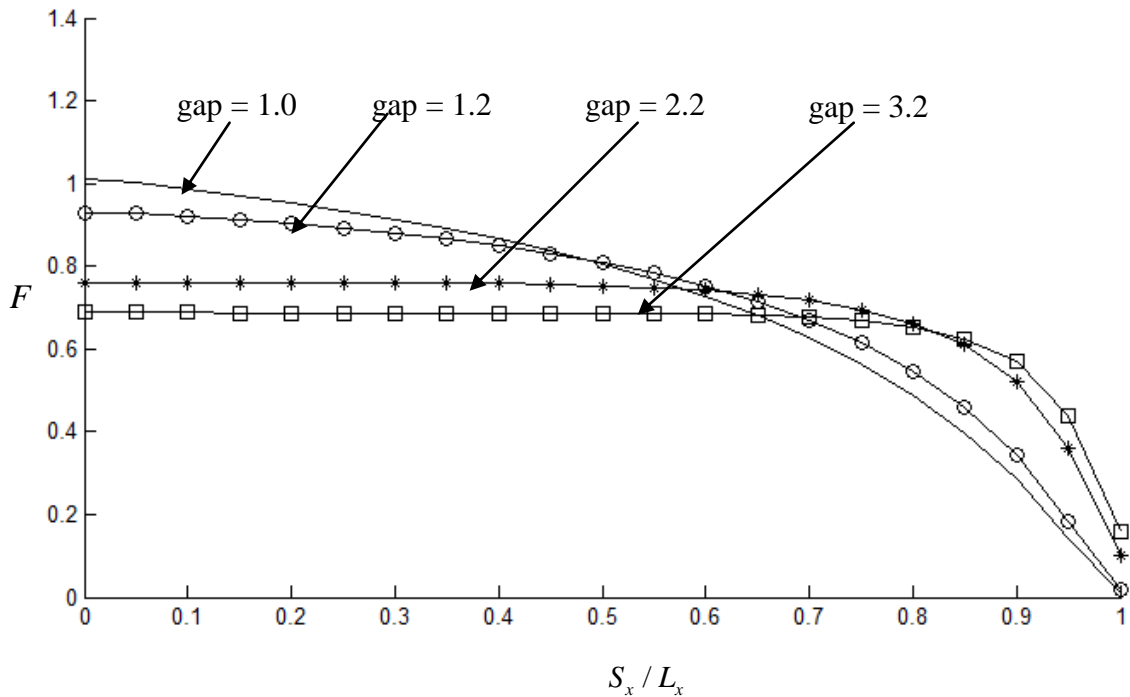
Kondisi Slip Heterogeneous Slip Condition

Gambar 3 menunjukkan prediksi distribusi tekanan film yang dinormalisasi tingkat ($P = ph_0^2 / \eta L_x u_x$) untuk beberapa gap (h/h_0) yang diprediksi oleh persamaan Reynolds termodifikasi (Persamaan 2). Dibandingkan dengan kondisi batas tanpa-slip, pola heterogen menghasilkan tekanan fluida positif ($S_x/L_x = 0.60$) yang lebih besar. Dengan permukaan ini, tekanan maksimum terjadi tidak pada *convergent wedge* seperti yang diprediksi oleh teori Reynolds klasik, tetapi pada permukaan yang paralel. Tekanan maksimum yang diprediksi untuk gap yang sejajar tiga kali lebih besar dibandingkan dengan kontak tanpa-slip dengan gap sebesar 2.2. Pada gap paralel dengan kondisi batas tanpa-slip, tidak ada tekanan yang dihasilkan. Dari gambar dapat dilihat bahwa tekanan mendekati distribusi segitiga ketika gap mendekati bentuk sejajar.

Gambar 4 menunjukkan gesekan permukaan tak berdimensi, F di dasar permukaan yang diam. Gesekan dengan permukaan berpola slip heterogen menjadi lebih kecil dibanding bantalan tradisional. Ketika tidak ada efek *wedge* (paralel) dan $S_x/L_x = 0.60$, bantalan memberikan gesekan minimum sebesar 0.65, sementara permukaan tanpa-slip memberikan gesekan minimum 0.77 pada gap 2.2. Dari Gambar 4 ini dapat diketahui pula bahwa sangat mungkin untuk mendapatkan bantalan dengan gesekan yang lebih rendah bila slip dibuat heterogen. Pada kasus gap paralel, setelah rasio daerah slip/tanpa-slip diperbesar melebihi 0.65, gesekan menjadi semakin kecil dan paling kecil jika dibandingkan dengan gap-gap yang lain. Meskipun demikian, patut dicermati bahwa pelumasan pada bantalan, selain parameter gesekan, faktor kapasitas pembawa beban juga perlu mendapat perhatian. Kapasitas pembawa beban merupakan hasil integral distribusi tekanan yang dihasilkan oleh pelumas pada seluruh permukaan kontak. Dapat dilihat dari Gambar 3 bahwa integrasi tekanan ini menghasilkan nilai yang paling besar jika gap nya adalah paralel dan rasio daerah slip/tanpa slip sebesar 0.6. Dengan kata lain, pada rasio ini dua keuntungan diperoleh sekaligus, yaitu penurunan gesekan dan penambahan kapasitas pembawa beban. Jika kapasitas ini meningkat, maka kemungkinan terjadinya kontak antara dinding dengan dinding pada bantalan (salah satu penyebab bantalan cepat rusak) dapat berkurang. Selain itu, dapat diamati pula dari Gambar 4 ini bahwa pada gap-gap yang besar seperti pada gap 3.2, keuntungan penurunan gesekan juga masih dapat dicapai walaupun pemberian sifat *hydrophobic* ini mesti diperluas lagi menjadi sekitar 0.8 dari panjang total bantalan. Secara matematis (numerik), penurunan gesekan karena slip diakibatkan oleh penurunan gradien laju kecepatan yang terjadi pada pelumas. Dan karena slip mengikuti relasi Navier, penurunan ini berpengaruh terhadap gaya geser yang dihasilkan dan selanjutnya gaya gesekan.



Gambar 3. Distribusi tekanan film untuk beberapa nilai inklinasi. Kurva solid baik dengan penanda atau tidak merujuk pada tekanan yang dihasilkan oleh pola heterogen, dan garis putus-putus merujuk pada tekanan yang dihasilkan oleh permukaan tanpa-slip.



Gambar 4. Pengaruh panjang daerah slip, S_x , terhadap gesekan pada permukaan bawah untuk beberapa nilai inklinasi.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis numerik seperti yang didiskusikan dalam seksi sebelumnya, dapat ditemukan bahwa slip dinding memiliki pengaruh terhadap perilaku hidrodinamika bantalan. Beberapa kesimpulan yang dapat diambil adalah :

- (1) Untuk kasus tanpa-slip, diperoleh korelasi yang sangat baik antara hasil prediksi dan solusi eksak distribusi tekanan dan gaya gesekan pada bantalan.
- (2) Untuk kasus pola slip heterogen pada permukaan paralel, telah ditunjukkan bahwa pengurangan gaya gesekan terjadi jika daerah slip lebih besar dari 0.6 panjang bantalan. Pengurangan dihitung 16 % - 23 % tergantung pada panjang daerah slip.

Oleh karena itu, perancangan permukaan kontak yang memiliki pola heterogen slip memiliki potensi yang sangat besar untuk digunakan pada komponen-komponen mesin terlubrikasi yang di dalamnya terdapat permukaan yang bergerak relatif, tidak hanya pada bantalan untuk mendapatkan performansi pelumasan yang maksimum.

DAFTAR PUSTAKA

- Bonaccuso, E., Butt, H.J., dan Craig, V.S.J.. (2003). Surface roughness and hydrodynamic boundary slip of a Newtonian fluid in a completely wetting system. *Physical Review Letters*, 90, 144501.
- Bonaccuso, E., Kappl, M., dan Butt, H.J. (2002). Hydrodynamic force measurement: boundary slip of water on hydrophilic surfaces and electrokinetic effects. *Physical Review Letters*, 88, 076103.
- Cameron, A. (1966), *The Principles of Lubrication*, Longman Green and Co., Ltd, London.
- Craig, V.S.J., Neto, C., dan Williams, D.R.M. (2001). Shear-dependent boundary slip in an aqueous Newtonian liquid. *Physical Review Letters*, 87, 054504.
- Ellahi, R. (2009). Effect of the slip boundary condition on non-Newtonian flows in a channel. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 14, 1377 – 1384.
- Lauga, E., Brenner, M.P., dan Stone, H.A. (2007). *Microfluidic: the no-slip boundary condition. Handbook of Experimental Fluid Dynamics*, Tropea C., Yarin A., Foss J. F. (Eds.), Springer, New-York.

- Navier, C.L.M.H. (1823). Mémoire sur les lois du mouvement des fluides. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, 6, 389 – 440.
- Pit, R., Hervet, H., dan Leger, L. (2000). Direct experimental evidence of slip in hexadecane: solid interfaces. *Physical Review Letters*, 85, 980 – 983.
- Reynolds, O. (1886). On the theory of lubrication dan its application to Mr. Beauchamp Tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Part I*, 177, 157 – 234.
- Smith, F.W. (1958). Lubricant behavior in concentrated contact systems – the Castor-oil steel system, *Wear*, 2, 250 – 263.
- Thompson, P.A., dan Troian, S.M. (1997). A general boundary condition for liquid flow at solid surfaces. *Nature*, 389, 360 – 362.
- Wu, C.W., Ma, G.J., dan Zhou, P. (2006). Low friction and high load support capacity of slider bearing with a mixed slip surface. *ASME-Journal of Tribology*, 128, 904 – 907.