
ANALISA PENGARUH VARIASI POLA *SLIP HETEROGEN* PADA PELUMASAN HIDRODINAMIK DENGAN KONDISI KAVITASI

K. R. Widodo, M. Tauviqirrahman, Jamari dan J.D. Setiawan

Magister Teknik Mesin, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedharto, UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia, Telepon: 024-7460059

e-mail: widodokurniawan@ymail.com

Abstrak

Dalam perancangan pelumasan hidrodinamik, interface antara pelumas dan permukaan dinding pada umumnya masih dianggap pada kondisi tanpa slip. Namun terbukti secara eksperimental bahwa slip terjadi pada permukaan baik hidrofobik maupun hidrofilik. Kondisi Navier-slip sering diusulkan sebagai pengganti kondisi batas. Meskipun demikian, dalam beberapa penelitian yang telah dipublikasikan, analisis performansi pelumasan dengan slip masih mengasumsikan bahwa kavitasi tidak terjadi.

Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh pemodelan kavitasi dalam analisa performansi pelumasan dengan slip. Performansi pelumasan yang ditinjau adalah daya dukung pelumasan. Persamaan Reynolds yang dimodifikasi dengan slip dikembangkan untuk mencari distribusi tekanan dalam kontak.

Metode volume hingga digunakan untuk mendiskretisasi persamaan Reynolds dan pemecahannya dilakukan dengan menggunakan Tri-Diagonal Matrix Algorithm (TDMA). Model kavitasi yang digunakan adalah Half-Sommerfeld (HS) dan Swift-Stieber (SS) pada aplikasi parallel slider bearing.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa parallel slider bearing dengan permukaan pola slip heterogen mampu menciptakan tekanan hidrodinamik dan daya dukung pelumasan. Model kavitasi HS dan SS memiliki pengaruh yang signifikan pada daya dukung pelumasan dibanding dengan analisis tanpa kavitasi. Dengan memperhitungkan model kavitasi didapatkan peningkatan distribusi tekanan sekitar 14 %. Model kavitasi SS memberikan daya dukung pelumasan yang lebih besar sekitar 35 % dibandingkan dengan model HS. Hal ini dapat membawa ide baru dalam penelitian ilmiah dan desain rekayasa untuk Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Oleh karena itu disarankan untuk memasukkan model kavitasi dalam analisis perhitungan pelumasan hidrodinamik untuk mendapatkan hasil riil dengan meniadakan tekanan negatif dan didapatkan daya dukung pelumasan yang lebih besar.

Kata kunci: slider bearing, slip, metode volume hingga, kavitasi.

PENDAHULUAN

Pelumasan sangat diperlukan untuk memperkecil gesekan dan keausan yang terjadi antara dua permukaan yang bergerak relatif satu terhadap yang lain. Sedangkan substansi yang digunakan tersebut dinamakan pelumas (Shigley, 1995). Dengan pelumasan diharapkan akan memperpanjang umur komponen suatu mesin karena adanya film pada pelumas untuk meminimalkan kontak antara permukaan sehingga mesin menjadi lebih efisien (Pirro, 2001). Mekanika fluida memainkan peran penting dalam bidang pelumasan. Pelumasan antara dua permukaan elemen mesin yang bergerak menciptakan distribusi tekanan yang memungkinkan timbulnya daya dukung beban sehingga menghindarkan kontak langsung dan gesekan (Fortier, 2004). Untuk menjelaskan fenomena ini, secara umum digunakan Persamaan Reynolds. Persamaan Reynolds yang dikembangkan pada tahun 1886 ini didasarkan pada asumsi tanpa slip antara *interface* pelumas dan permukaan solid. Dalam hal ini kecepatan pelumas pada permukaan solid ditetapkan sama dengan kecepatan permukaan tersebut atau kecepatan relatif pelumas dengan permukaan solid adalah nol. Ini berarti bahwa tegangan geser pada *interface* antara pelumas dan permukaan solid dapat mencapai nilai yang besar (Wu, 2006).

Dengan kondisi tersebut di atas maka asumsi batas tanpa slip perlu dipertimbangkan kembali. Untuk itu perlu memodifikasi persamaan Reynolds dengan memasukkan batas slip. Kondisi *Navier-slip* sering diusulkan sebagai pengganti kondisi batas. Selama beberapa tahun terakhir ini, penelitian tentang batas slip telah banyak dilakukan, antara lain pada permukaan hidrofobik (Pit, 2000) maupun hidrofilik (Choo, 2007). Penelitian tentang slip yang dilakukan menyebabkan pengurangan gaya gesek (Ou, 2004). Hal ini memungkinkan untuk merancang *Micro Electro Mechanical Systems* (MEMS) terlumasi, dengan gaya gesek yang rendah. Isu penting

dalam sistem pelumasan MEMS adalah besarnya gaya permukaan seperti adhesi, gesekan, dan tegangan permukaan sehingga terjadi *stiction* yang menyebabkan peralatan tidak dapat menjalankan fungsinya dengan baik. Akan tetapi jika slip seragam, cenderung mengurangi daya dukung pelumasan dalam kontak terlumasi. Ketika peralatan beroperasi dengan beban eksternal tertentu, jika daya dukung menurun akan mengurangi ketebalan film yang cenderung meningkatkan gesekan (Bayada, 2009). Maka diperlukan pengaturan pola heterogen slip/tanpa slip pada permukaan bearing, sehingga didapatkan gaya gesek serendah mungkin dengan daya dukung pelumasan sebesar mungkin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *geometry wedge*, dalam hal ini *convergent wedge* dan *parallel gap* dapat menimbulkan tekanan hidrodinamik pada *slider bearing* dengan *Mixed Slip Surface* (MSS). Meskipun demikian, dalam beberapa penelitian yang telah dipublikasikan (Wu, 2006; Spikes, 2003; Salant, 2004), analisa performansi pelumas dengan slip masih mengasumsikan bahwa kavitasasi tidak terjadi.

Dengan kondisi tersebut, maka diperlukan suatu penelitian tentang pengaruh pemodelan kavitasasi dalam analisa performansi pelumasan dengan slip. Performansi pelumasan yang ditinjau adalah daya dukung pelumasan. Metode volume hingga digunakan untuk mendiskretisasi persamaan Reynolds dan pemecahannya dilakukan dengan menggunakan *Tri-Diagonal Matrix Algorithm* (TDMA). Model kavitasasi yang digunakan adalah *Half-Sommerfeld* (HS) dan *Swift-Stieber* (SS) pada aplikasi *parallel slider bearing*.

LANDASAN TEORI

Pelumasan dengan slip pada interface pelumas-permukaan solid

Kondisi pelumasan hidrodinamik sangat diharapkan dalam sistem pelumasan karena mampu memisahkan dengan sempurna dua permukaan yang bergerak relatif, sehingga tidak terjadi gesekan dan keausan antar dua permukaan solid. Salah satu aplikasi pelumasan hidrodinamik adalah *slider bearing* yang digunakan menumpu beban pada gerakan *sliding*.

Perdebatan tentang validitas dari asumsi-asumsi persamaan Reynolds didorong oleh perkembangan teknologi yang memerlukan pemahaman tentang perilaku pelumas pada *interface*. Ditemukan bahwa slip terjadi pada *interface* pelumas-permukaan solid menggunakan pelumas Newtonian (Pit, 2000; Zhu, 2001; Salant, 2004; Ou, 2004; Wu, 2006).

Dalam kontak terlumasi terutama pada MEMS, gaya gesekan yang rendah dan daya dukung pelumasan yang tinggi adalah tujuan yang ingin dicapai.

Daya dukung pelumasan (W) dirumuskan sebagai berikut (Stackhowiak, 2005):

$$W = \int_0^{L_y} \int_0^{L_x} p \, x, y \, dx dy \quad (1)$$

Analisis kavitasasi dalam kontak slip/tanpa slip secara heterogen

Zona slip yang diletakkan di depan zona tanpa slip pada permukaan diam menimbulkan efek *wedge* pada kontak, mirip dengan yang disebabkan oleh geometri konvergen. Di sisi lain, zona slip yang terletak dibelakang zona tanpa slip cenderung mengurangi tekanan seperti geometri divergen, dan ini dapat menyebabkan terjadinya kavitasasi (Bayada, 2009). Perilaku yang menguntungkan tersebut dapat menghambat jika lokasi dari area slip/tanpa slip menyebabkan kavitasasi. Kavitasasi merupakan fenomena campuran gas dan pelumas pada sistem pelumasan. Akibat dari kavitasasi adalah adanya vibrasi dan erosi. Pada skala mikro akan mengurangi ketebalan film dan mengurangi daya dukung pelumasan sehingga terjadi keausan yang mengakibatkan kerusakan pada mesin. Efek kavitasasi pada persamaan Reynolds akan memberikan tekanan negatif karena persamaan Reynolds hanya valid untuk kondisi pelumasan *fully flooded*. Oleh karena itu kavitasasi dapat mengurangi daya dukung pelumasan secara signifikan karena dalam perhitungan dengan teori hidrodinamik mengasumsikan tidak ada kavitasasi (Stachowiak, 2005).

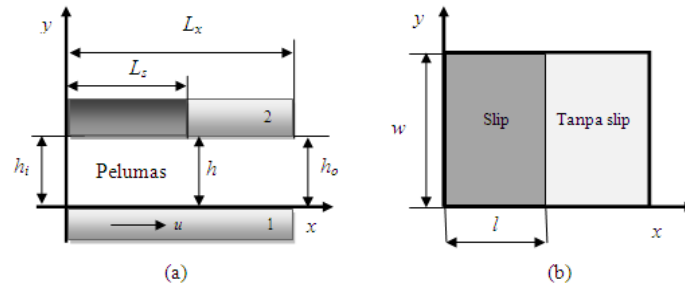
Pemodelan kavitasasi secara teoritis diantaranya adalah model *Half-Sommerfeld* (Model HS) dan *Swift-Stieber* (Model SS). Model HS terdiri dari pemecahan persamaan Reynolds dengan kondisi batasnya, dan kemudian mengganti tekanan negatif dengan nol, maka memungkinkan definisi zona *full fluid*. Distribusi tekanan hanya memungkinkan pada daerah tekanan positif. Swift dan Stieber menyatakan bahwa tekanan derivatif nol adalah kondisi yang tepat untuk menandai dimulainya kavitasasi dan menganggapnya sebagai kondisi stabil dan mengasumsikan tekanan

gradien nol pada awal dari zona kavitasi, tapi pada kondisi kontinuitas (Braun, 2010). Cara praktis Model SS dalam perhitungan tekanan ini adalah mendeskritisasi persamaan Reynolds dengan menetapkan setiap nilai tekanan negatif ke nol pada setiap langkah dari algoritma iteratif.

METODOLOGI

Penyelesaian permasalahan secara numerik dengan metode volume hingga untuk mendiskretisasi persamaan Reynolds termodifikasi dengan slip menggunakan TDMA.

Kontak *sliding* dimodelkan pada kondisi *parallel gap*. Permukaan atas merupakan permukaan diam. Sedangkan permukaan bawah bergerak dengan kecepatan u . Pola heterogen slip/tanpa slip diterapkan pada permukaan diam seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. (a) Pemodelan *parallel slider bearing* pandangan dari samping. (b) Permukaan 2 dengan pola heterogen slip/tanpa slip.

Persamaan Reynolds klasik dimodifikasi dengan cara memasukkan kondisi batas slip pada batas:

Permukaan bawah $z = 0, u_x = u_s$ dan $u_y = 0$

Permukaan atas $z = h, u_x = -\alpha\eta \frac{\partial u_x}{\partial z}$ dan $u_y = -\alpha\eta \frac{\partial u_y}{\partial z}$ (2)

dengan memasukkan kondisi batas tersebut didapatkan Persamaan Reynolds termodifikasi slip 2D:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \left(1 + \frac{3\alpha\eta}{h + \alpha\eta} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \left(1 + \frac{3\alpha\eta}{h + \alpha\eta} \right) \right\} = 6\eta u_s h \frac{\partial}{\partial x} \left(1 + \frac{\alpha\eta}{h + \alpha\eta} \right) \quad (3)$$

Kemudian dilakukan diskretisasi persamaan Reynolds termodifikasi dengan SLM. Model area kontak dengan area persegi pada bidang xy dibuat menjadi sebuah *grid* dengan ukuran 40×40 .

Langkah selanjutnya adalah melakukan proses perhitungan dalam hal ini digunakan TDMA. TDMA yang dilakukan adalah tiap baris dari awal sampai akhir dan tiap kolom dari awal sampai akhir sehingga didapatkan nilai pada seluruh nodal komputasi dalam hal ini adalah nilai tekanan. Proses iterasi akan berlangsung terus menerus sampai nilai tekanan mencapai nilai konvergensinya, yaitu $P_{\text{residual}} \leq 10^{-6}$. Setelah didapatkan nilai tekanan tiap nodal, maka langkah selanjutnya adalah menghitung parameter performansi, dalam hal ini daya dukung pelumasan. Langkah ini merupakan langkah terakhir yang dilakukan dalam membuat kode pemrograman numerik.

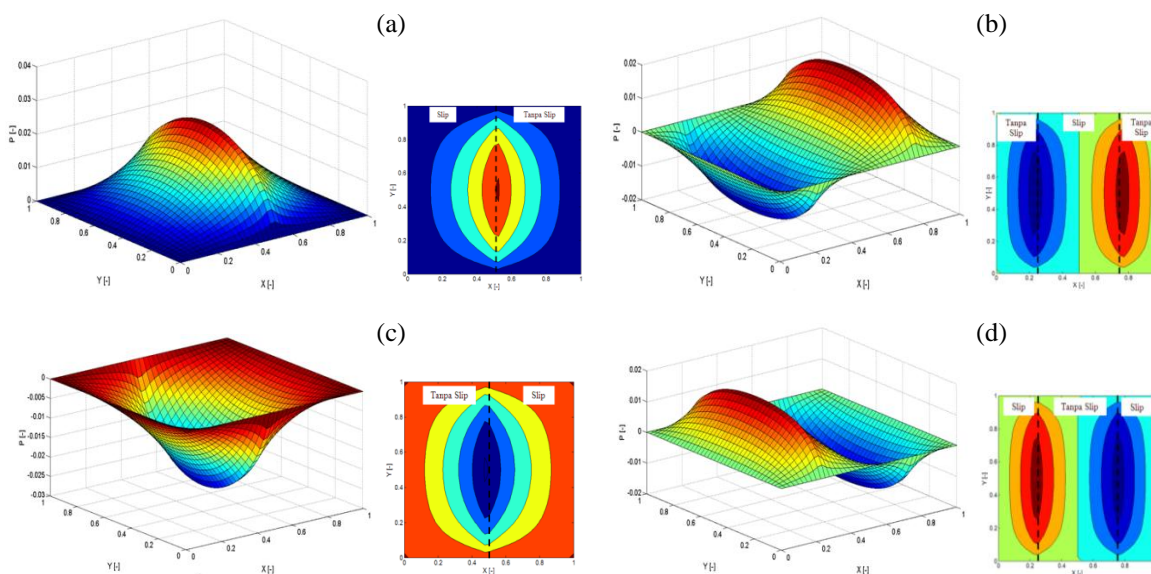
Semua hasil yang didapatkan ditunjukkan dengan parameter tak berdimensi, antara lain:

$$X = \frac{x}{L_x} \quad Y = \frac{y}{L_y} \quad P = \frac{ph_o^2}{6\eta u L_x} \quad W = \frac{wh_o^2}{6\eta u L_x^2 L_y} \quad (4)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan *parallel slider bearing* tanpa memperhitungkan model kavitasi

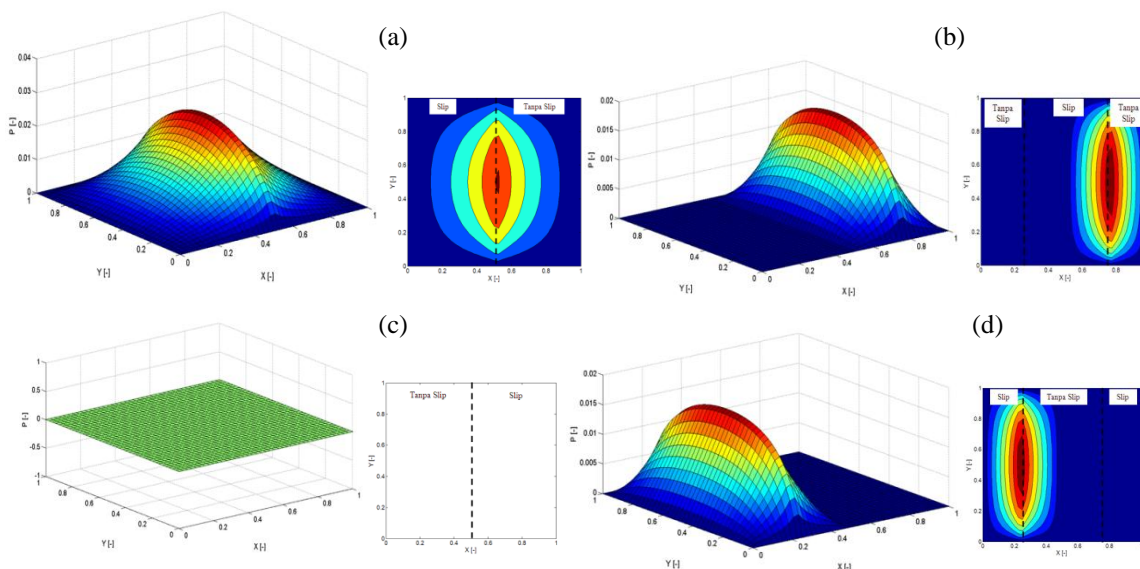
Pada $\varepsilon = 1$ dan koefisien slip (α) = $2,5 \cdot 10^{-4}$ dengan batas panjang bearing tak berdimensi $0 \leq X \leq 0,5$; $0,25 \leq X \leq 0,75$; $0,5 \leq X \leq 1$ dan $0 \leq Y \leq 1$ adalah kondisi slip dan lainnya kondisi tanpa slip, serta $0,25 \leq X \leq 0,75$ dan $0 \leq Y \leq 1$ adalah kondisi tanpa slip dan lainnya kondisi slip, dari perhitungan numerik pada kondisi pola heterogen slip/tanpa slip tanpa memperhitungkan model kavitasi didapatkan profil distribusi tekanan tak berdimensi ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Distribusi tekanan tak berdimensi tanpa memperhitungkan kavitasi dan pandangan dari atas. (a) $0 \leq X \leq 0,5$ dan $0 \leq Y \leq 1$ adalah kondisi slip (b) $0,25 \leq X \leq 0,75$ dan $0 \leq Y \leq 1$ adalah kondisi slip (c) $0,75 \leq X \leq 1$ dan $0 \leq Y \leq 1$ adalah kondisi slip (d) $0,25 \leq X \leq 0,75$ dan $0 \leq Y \leq 1$ adalah kondisi tanpa slip.

Pemodelan dengan memperhitungkan model kavitasi *Half-Sommerfeld* (HS)

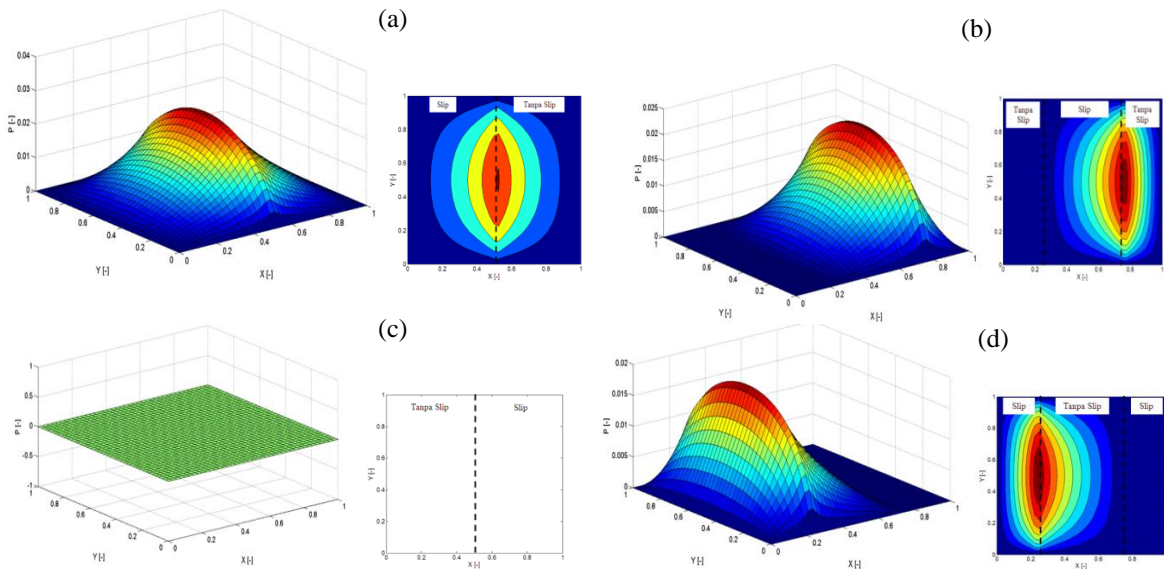
Pada $\varepsilon = 1$ dan koefisien slip (α) = $2,5 \cdot 10^{-4}$ dengan batas panjang bearing tak berdimensi $0 \leq X \leq 0,5$ ($d = 0$); $0,25 \leq X \leq 0,75$ ($d = 0,25$); $0,5 \leq X \leq 1$ ($d = 0,5$) dan $0 \leq Y \leq 1$ adalah kondisi slip dan lainnya kondisi tanpa slip, serta $0,25 \leq X \leq 0,75$ dan $0 \leq Y \leq 1$ adalah kondisi tanpa slip dan lainnya kondisi slip ($d = 0,75$), dari perhitungan numerik pada kondisi pola heterogen slip/tanpa slip dengan memperhitungkan model kavitasi HS didapatkan profil distribusi tekanan tak berdimensi ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Distribusi tekanan tak berdimensi dengan memperhitungkan model kavitasi HS dan pandangan dari atas. (a) $0 \leq X \leq 0,5$ dan $0 \leq Y \leq 1$ adalah kondisi slip (b) $0,25 \leq X \leq 0,75$ dan $0 \leq Y \leq 1$ adalah kondisi slip (c) $0,75 \leq X \leq 1$ dan $0 \leq Y \leq 1$ adalah kondisi slip (d) $0,25 \leq X \leq 0,75$ dan $0 \leq Y \leq 1$ adalah kondisi tanpa slip.

Pemodelan dengan memperhitungkan model kavitas *Swift-Stieber* (SS)

Pada $\varepsilon = 1$ dan koefisien slip (α) = $2,5 \cdot 10^{-4}$ dengan batas panjang bearing tak berdimensi $0 \leq X \leq 0,5$; $0,25 \leq X \leq 0,75$; $0,5 \leq X \leq 1$ dan $0 \leq Y \leq 1$ adalah kondisi slip dan lainnya kondisi tanpa slip, serta $0,25 \leq X \leq 0,75$ dan $0 \leq Y \leq 1$ adalah kondisi tanpa slip dan lainnya kondisi slip, dari perhitungan numerik pada kondisi pola heterogen slip/tanpa slip dengan memperhitungkan model kavitas SS didapatkan profil distribusi tekanan tak berdimensi ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Distribusi tekanan tak berdimensi dengan memperhitungkan model kavitas SS dan pandangan dari atas. (a) $0 \leq X \leq 0,5$ dan $0 \leq Y \leq 1$ adalah kondisi slip (b) $0,25 \leq X \leq 0,75$ dan $0 \leq Y \leq 1$ adalah kondisi slip (c) $0,75 \leq X \leq 1$ dan $0 \leq Y \leq 1$ adalah kondisi slip (d) $0,25 \leq X \leq 0,75$ dan $0 \leq Y \leq 1$ adalah kondisi tanpa slip.

Dari perhitungan numerik didapatkan distribusi tekanan tak berdimensi $P [-]$ dan daya dukung pelumasan tak berdimensi $W [-]$ seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil distribusi tekanan tak berdimensi $P [-]$ dan daya dukung pelumasan tak berdimensi $W [-]$

Lokasi slip	Tanpa model kavitas			Model kavitas HS			Model kavitas SS		
	$P_{max} [-]$	$P_{min} [-]$	$W [-]$	$P_{max} [-]$	$P_{min} [-]$	$W [-]$	$P_{max} [-]$	$P_{min} [-]$	$W [-]$
$d = 0$	0,0253	0	0,0078	0,0253	0	0,0078	0,0253	0	0,0078
$d = 0,25$	0,0173	-0,0173	$-5,65 \cdot 10^{-12}$	0,0173	0	0,0033	0,0208	0	0,0052
$d = 0,5$	0	-0,0253	-0,0078	0	0	0	0	0	0
$d = 0,75$	0,0171	-0,0171	$3,79 \cdot 10^{-12}$	0,0171	0	0,0032	0,0195	0	0,0049

Pada kasus 2D dalam kontak terlumasi dimana zona slip seluruhnya terletak di depan zona tanpa slip didapatkan hasil bahwa tidak terjadi kavitas pada area kontak dan terdapat distribusi tekanan dan daya dukung pelumasan seperti nampak pada Gambar 2(a). Sebaliknya seluruh atau sebagian zona tanpa slip diletakkan di depan zona slip didapatkan hasil bahwa terdapat area distribusi tekanan negatif yang menyebabkan kavitas, seperti terlihat pada Gambar 2(b), 2(c) dan 2(d). Dari perhitungan numerik didapatkan harga negatif pada daya dukung beban pelumasan. Dengan memasukkan model kavitas HS dan SS dapat meniadakan tekanan negatif dan didapatkan distribusi tekanan dan daya dukung pelumasan yang lebih besar seperti nampak pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Dengan demikian pola slip heterogen pada *parallel slider bearing* dapat memberikan mekanisme tekanan hidrodinamik pada sistem pelumasan. Hal ini membawa pemikiran baru dari teori Reynolds klasik yang menyatakan bahwa dibutuhkan *convergence wedge* untuk menghasilkan tekanan hidrodinamik. Dengan memasukkan model kavitasasi dalam perhitungan didapatkan peningkatan distribusi tekanan dan daya dukung pelumasan yang lebih besar dan hasil riil dengan meniadakan harga negatif pada tekanan dan daya dukung pelumasan seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Hal ini dapat membawa ide baru dalam penelitian ilmiah dan desain rekayasa untuk *Micro Electro Mechanical Systems* (MEMS).

KESIMPULAN

Kesimpulan yang bisa diambil dari penelitian ini adalah sebuah transisi dari permukaan area slip di depan ke permukaan tanpa slip di belakangnya cenderung meningkatkan distribusi tekanan pelumasan, sebaliknya transisi dari permukaan tanpa slip di depan permukaan slip cenderung menurunkan distribusi tekanan pelumasan dan kemungkinan untuk memulai kavitasasi. Dengan memasukkan model kavitasasi didapatkan distribusi tekanan pelumasan dan daya dukung pelumasan yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa memasukkan model kavitasasi. Peningkatan distribusi tekanan pelumasan sekitar sekitar 14 % dan didapatkan model kavitasasi SS memberikan daya dukung beban pelumasan yang lebih besar dibandingkan dengan model HS, sebesar 35 %. Dengan pemodelan kavitasasi, hasil analisis performansi pelumasan menjadi lebih realistis karena dapat meniadakan harga negatif pada distribusi tekanan dan daya dukung pelumasan. Oleh karena itu disarankan memasukkan model kavitasasi dalam analisis performansi pelumasan untuk mendapatkan distribusi tekanan dan daya dukung pelumasan yang lebih besar dan hasil yang realistis dengan meniadakan tekanan negatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Bayada, G., Meurisse, M.H., 2009, "Impact of the cavitation model on the theoretical performance of heterogeneous slip/no-slip engineered contacts in hydrodynamic condition", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* **223**, 371-381.
- Braun, M.J., Hannon, W.M., 2010, "Cavitation formation and modelling for fluid film bearings: a review", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* **224**, 339-863.
- Choo, J.H., Spikes, H.A., Ratoi, M., 2007, "Friction reduction in low-load hydrodynamic lubrication with a hydrophobic surface", *Tribology International* **40**, 154-159.
- Fortier, A., 2004, "Numerical Simulation of Hydrodynamic Bearings with Engineered Slip/No-Slip Surfaces", Master's Thesis, Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology.
- Ou, J., Perot, B., Rothstein, P., 2004, "Laminar Drag Reduction in Microchannels Using Ultrahydrophobic Surfaces", *Physical Fluids* **16**, 4635-4643.
- Pirro, D.M., Wessol, A.A., 2001, "Lubrication Fundamentals", Marcel Dekker, Switzerland.
- Pit, R., Hervet, H., Leger, L., 2000, "Direct experimental evidence of slip in hexadecane: solid interfaces", *Physical Review Letters* **85**, 980-983.
- Salant, R.F and Fortier, A.E., 2004, "Numerical analysis of a slider bearing with a heterogeneous slip/no-slip surfaces," *Tribology Transactions* **47**, 328-334.
- Shigley, Joseph E., Larry D., Harahap, 1995, "Perencanaan Teknik Mesin", Erlangga, Jakarta.
- Spikes, H.A., 2003, "The half-wetted bearing. Part 2: Potential application in low load contacts", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* **217**, 15-26.
- Stackowiak, G.W., Batchelor, A.W., "Engineering Tribology", Elsevier, 2005.
- Wijnant, Y.H., 1998, "Contact Dynamics in the field of Elastohydrodynamic Lubrication", Master's Thesis, University of Twente.
- Wu C.W., Ma, G.J., 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.