

## STUDI PERFORMANSI *TEXTURED BEARING* DENGAN PELUMAS NON-NEWTONIAN DENGAN MEMPERTIMBANGKAN SLIP DAN KAVITASI

\*M. Tauvqiirrahman, B. Muthik, R. Risky

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

\*E-mail: mohammad.tauvqiirrahman@ft.undip.ac.id

### ABSTRAK

Saat ini, dalam dunia medis telah dikembangkan berbagai peralatan biomekanik yang dibuat untuk memperbaiki kualitas kesehatan manusia. Dalam peralatan tersebut, *bearing* merupakan salah satu elemen-elemen mesin yang memiliki fungsi vital. Hal ini dikarenakan *bearing* berfungsi membatasi gerak relatif antara dua atau lebih komponen mesin agar selalu bergerak pada arah yang diinginkan. Dengan menjaga fungsi pelumasan pada *bearing*, maka putaran bisa berlangsung secara halus dan aman, sehingga diharapkan pada akhirnya nanti peralatan kesehatan tersebut dapat mempunyai umur pakai yang lebih panjang. Penelitian-penelitian tentang pelumasan pada *bearing* saat ini banyak mengasumsikan pelumas bersifat Newtonian. Dalam kenyataannya, pelumas pada *bearing* di tingkat lapangan memiliki karakteristik non-Newtonian. Oleh karena itu, dalam penelitian kali ini, *bearing* dengan pelumas non Newtonian akan dianalisa lebih lanjut dengan menggunakan CFD (*computational fluid dynamic*). Permukaan kontak pada *bearing* akan dimodifikasi dengan tekstur dan slip untuk meningkatkan performansi pelumasan. Kedalaman tekstur divariasikan sebesar 0.1 dan 0.75 kali ketebalan film pelumas. Daya dukung beban dan gesekan menjadi dua parameter utama performansi pelumasan yang akan dianalisa. Dalam tulisan ini, perbandingan hasil antara analisa yang mempertimbangkan model kavitasasi dengan yang tidak, menjadi pokok kajian. Hasil simulasi menunjukkan bahwa terdapat perbedaan hasil numerik antara yang mempertimbangkan kavitasasi dan yang tidak sampai dengan 20 %. Selain itu, dengan memberikan slip pada tekstur dapat meningkatkan performansi daya dukung beban sebesar 300 % dengan menjaga gesekan tetap kecil. Hasil penelitian kali ini dapat dijadikan sebagai langkah awal untuk memperbaiki kualitas performansi *textured bearing* yang berpelumas non Newtonian.

**Kata kunci:** CFD (*computational fluid dynamic*), kavitasasi, non Newtonian, pelumasan, slip, tesktur

### 1. PENDAHULUAN

*Bearing* merupakan elemen mesin yang dirancang untuk menahan beban eksternal dengan mengandalkan gerak relatif antara dua permukaan yang sedang kontak. Pemberian pelumas dapat menghindari kontak langsung antar permukaan sehingga keausan (*wear*) dapat dihindari [1]. Adanya gradien tekanan yang terjadi dalam *clearance* menghasilkan daya dukung beban. Selain itu, dikarenakan adanya daerah konvergen-divergen dalam *bearing*, fenomena kavitasasi sangat mungkin terjadi. Dari sudut pandang numerik, fenomena kavitasasi dapat dimodelkan dan dikategorikan ke dalam beberapa kelompok, yaitu dengan menggunakan teori Sommerfeld, teori Half-Sommerfeld, teori Reynolds, atau dengan menggunakan kekekalan massa. Dua teori yang pertama merupakan pendekatan yang kasar karena tidak mencerminkan fenomena fisik yang nyata [2].

Dari studi pustaka, dapat diketahui bahwa hanya sedikit sekali tulisan yang menjelaskan hasil penelitian terkait dengan simulasi numerik pada *bearing* dengan pelumas non Newtonian baik yang mempertimbangkan model kavitasasi maupun yang tidak. Mishra [3] mengembangkan metode numerik dengan memecahkan persamaan Reynolds dan energi untuk menginvestigasi pengaruh *journal misalignment* dengan pelumas non Newtonian. Untuk menjelaskan karakteristik pelumas dalam daerah kavitasasi, metode Elrod [4] telah digunakan. Yadav dan Sharma [5] telah menganalisa pengaruh parameter tekstur terhadap karakteristik statik dan dinamik pada *bearing*. Lin dkk [6] telah mempelajari pengaruh non-Newtonian terhadap batas stabilitas *bearing* melalui analisis transien non-linear. Pratomo dkk [7] telah menginvestigasi pengaruh kombinasi tekstur dan kondisi batas slip terhadap tekanan hidrodinamik. Persamaan Reynolds yang sudah dimodifikasi untuk pelumasan dengan karakteristik non-Newtonian power-law telah dikembangkan. Hasil simulasi mereka menunjukkan bahwa daya dukung beban maksimum dicapai ketika kedalam tekstur sama dengan ketebalan film. Meskipun demikian, dalam penelitian mereka kondisi batas Reynolds digunakan untuk memodelkan kavitasasi. Penelitian berikutnya, Tauvqiirrahman dkk [8] dengan menggunakan pendekatan numerik persamaan kekekalan massa untuk memodelkan kavitasasi telah mengadakan penelitian tentang performansi pelumasan hidrodinamika pada kasus *bearing* bertekstur tunggal. Dalam penelitian terbaru, Khatri dan Sharma [9] telah melakukan studi perbandingan antara permukaan yang bertekstur dengan yang tidak bertekstur pada *journal bearing*. Dalam studi mereka, analisis dilakukan dengan menggunakan teori Reynolds yang hasilnya masih diragukan karena kemungkinan adanya efek inersia.

Berdasarkan penelusuran pustaka seperti yang telah dijelaskan, dapat diambil kesimpulan bahwa penelitian karakteristik *bearing* dengan pelumas non Newtonian yang mempertimbangkan model kavitasasi masih sangat sedikit. Bermula dari pemahaman bahwa model kavitasasi memiliki dampak yang sangat besar terhadap hasil analisis *bearing*, maka metode numerik berbasis model CFD (*computational fluid dynamic*) akan dikembangkan. Selain itu, UDF (*user-defined function*) juga dibuat untuk memodelkan kondisi batas slip pada permukaan. Dalam penelitian kali ini, pengaruh kedalaman tekstur akan diteliti baik dengan kondisi batas slip maupun tidak. Selain itu, pengaruh pemodelan kavitasasi terhadap prediksi perhitungan performansi pelumasan (daya dukung beban dan gesekan) juga dilakukan.

## 2. PERSAMAAN UMUM

Persamaan yang digunakan adalah persamaan Navier–Stokes dan kontinuitas yang dipecahkan dengan menggunakan metode volume hingga. Persamaan tersebut mengasumsikan densitas dan viskositas konstan, tanpa melibatkan gaya bodi. Kondisi *steady* dan pemecahan dalam arah dua dimensi ( $x$  dan  $z$ ) juga digunakan. Persamaan Navier-Stokes dan kontinuitas diekspresikan sebagai berikut:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{u} \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{2}$$

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 baik secara numerik [10] maupun eksperimen [11], [12]. Ketika pelumas mengalami slip di sepanjang permukaan *solid-liquid*, panjang slip  $\beta$  sebagai ukuran tingkap slip suatu pelumas dinyatakan dengan hubungan sebagai berikut:

$$u_s = \beta \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{\text{permukaan}} \tag{3}$$

dimana  $u_s$  mengindikasikan kecepatan slip pada permukaan *hydrophobic*,  $\beta$  panjang slip, dan  $\partial u / \partial z|_{\text{dinding}}$  sebagai laju geser permukaan. Dalam penelitian ini, panjang slip pada permukaan *hydrophobic* diasumsikan uniform dalam ruang dengan  $\beta$  sebesar 1  $\mu\text{m}$  [11].

Dalam penelitian ini, karakteristik non-Newtonian dimodelkan dengan skema model *power-law*. Artinya adalah bahwa tegangan geser  $\tau$  merupakan fungsi tingkat dari laju regangan  $\dot{\gamma}$ . Hubungan tegangan-regangan ini dapat dimodelkan sebagai berikut:

$$\tau = m(\dot{\gamma})^n \tag{4}$$

Dalam kavitasasi, transfer massa *liquid-vapor* (evaporasi dan kondensasi) dimodelkan dengan menggunakan persamaan *vapor transport* [13] sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \mathbf{v}) = R_g - R_c \tag{5}$$

dimana  $\alpha_v$  adalah fraksi volume *vapour* dan  $\rho_v$  adalah densitas *vapour*.  $R_g$  dan  $R_c$  merujuk kepada transfer massa antara fasa liquid dan fasa *vapour* dalam kavitasasi. Untuk model Zwart-Gelber-Belamri, bentuk akhir persamaan kavitasasi adalah sebagai berikut [14]:

Jika  $p \leq p_v$ ,

$$\text{maka } R_g = F_{\text{evap}} \frac{3\alpha_{\text{nuc}} (1 - \alpha_v) \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2 P_0 - P}{3 \rho_\ell}} \tag{6}$$

Jika  $p \geq p_v$ ,

$$\text{maka } R_c = F_{\text{cond}} \frac{3\alpha_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2 P - P_v}{3 \rho_\ell}} \tag{7}$$

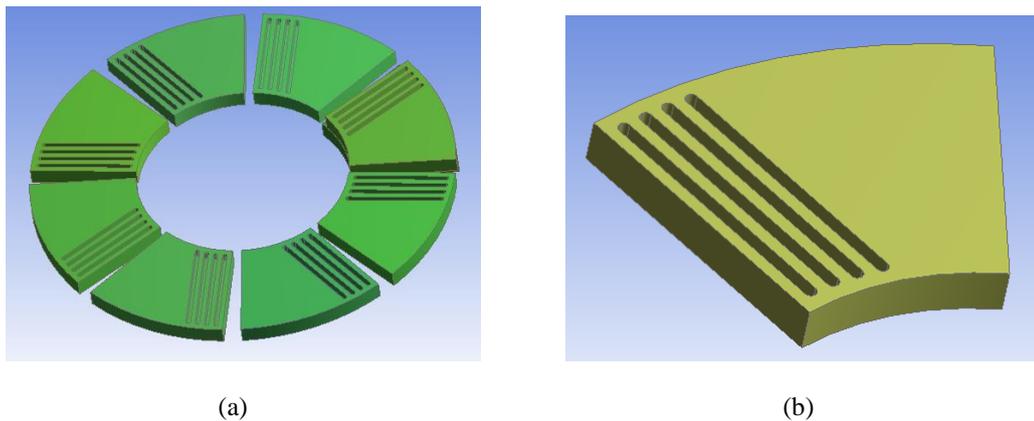
dimana  $F_{evap}$  = koefisien evaporasi = 50,  $F_{cond}$  = koefisien kondensasi = 0.01,  $R_B$  = radius gelembung-gelembung udara =  $10^{-6}$  m,  $\alpha_{nuc}$  = fraksi volume situs nukleasi =  $5 \times 10^{-4}$ ,  $\rho_l$  = densitas liquid dan  $p_v$  = tekanan *vapour*.

### 3. METODE PENELITIAN

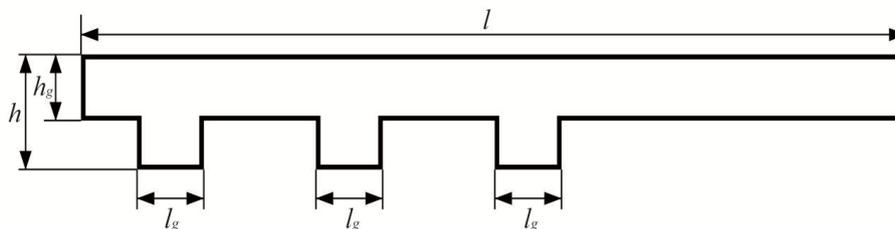
#### 3.1. Skema *bearing* dengan tekstur

Gambar 1 menyajikan geometri model tiga dimensi *textured bearing*. Sedangkan Gambar 2 menyajikan skema representasi *textured bearing* beserta besaran fisik yang ada. Pada *bearing* jenis ini, tekstur sengaja diberikan di bagian inlet pada permukaan yang diam untuk mendapatkan performansi pelumasan yang baik sesuai dengan hasil penelitian terkini [15]. Pada *bearing* ini ketebalan film atau ketinggian fluida memisahkan dua permukaan. Ketinggian fluida ini merupakan fungsi linier dari  $x$  (Persamaan 8).

$$h(x) = h_i - \frac{(h_i - h_o)}{L} x \tag{8}$$



Gambar 1. (a) Model 3D *textured bearing* dengan tekstur, (b) permukaan diam dalam *bearing* yang sudah diberi tekstur



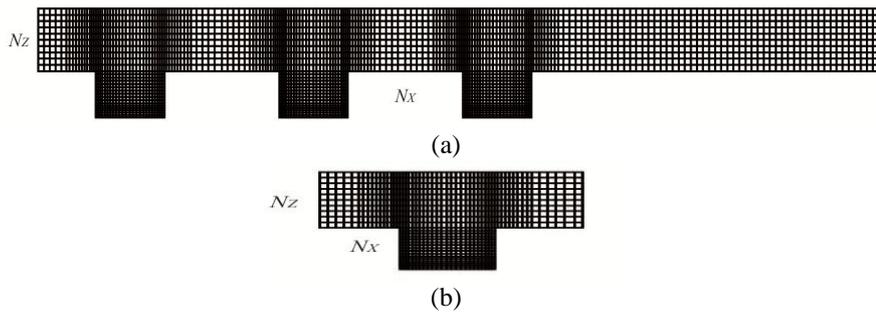
Gambar 2. Skema representasi *textured bearing*

Untuk keseluruhan simulasi dalam penelitian, geometri yang digunakan adalah seperti tersaji dalam Tabel 1 di bawah. Dalam penelitian ini, ada dua kedalaman tekstur yang digunakan. Kedalaman tekstur tak berdimensi  $H_d$  didefinisikan sebagai rasio antara kedalaman tekstur dengan ketebalan dasar film pelumas  $h_g$ .  $H_d$  yang digunakan adalah sebesar 0.75 dan 0.1.

Tabel 1. Data geometri bearing dengan tekstur

$H_d = 0.75$ :		$H_d = 0.1$ :	
Panjang bearing	$l = 6$ mm	Panjang bearing	$l = 6$ mm
Panjang daerah slip	$l_s = 2.1$ mm	Panjang daerah slip	$l_s = 2.1$ mm
Panjang tekstur	$l_g = 0.3$ mm	Panjang tekstur	$l_g = 0.3$ mm
Ketebalam total pelumas	$h = 52.5$ $\mu$ m	Ketebalam total pelumas	$h = 33$ $\mu$ m
Ketebalam dasar pelumas	$h_g = 30$ $\mu$ m	Ketebalam dasar pelumas	$h_g = 30$ $\mu$ m
Kedalaman tekstur	$h-h_g = 22.5$ $\mu$ m	Kedalaman tekstur	$h-h_g = 3$ $\mu$ m

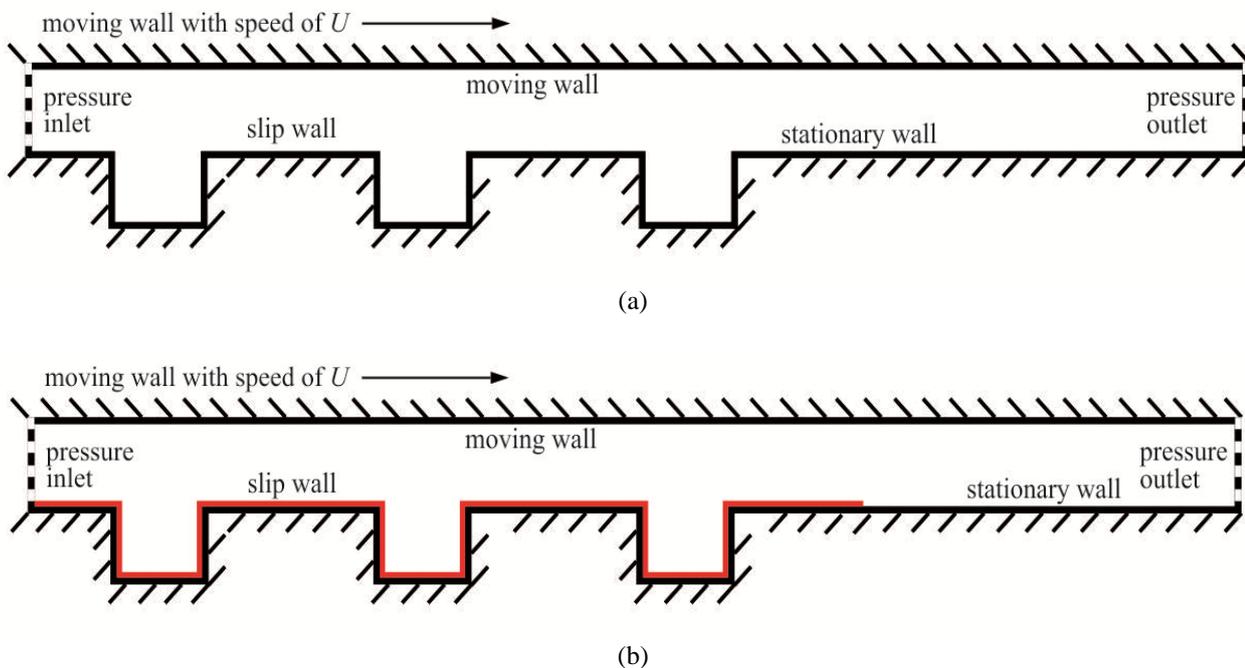
*Mesh* yang digunakan pada *textured bearing* ini terdiri dari tujuh blok dengan *grid* seragam pada masing masing tekstur. Jumlah titik *grid* pada arah longitudinal ( $N_x$ ) dan transversal ( $N_y$ ) adalah 900 x 50. Gambar 3 menyajikan pola mesh yang digunakan untuk simulasi.



Gambar 3. Gambar struktur *mesh* (a) Domain komputasi, (b) pembesaran *mesh* pada salah satu tekstur

3.2. Kondisi Batas dan Prosedur Solusi

Asumsi nilai tekanan pada sisi masuk dan keluar *bearing* diatur nol dan gradien kecepatan bernilai nol pada arah normal terhadap *sliding*. Pada permukaan yang bergerak, kondisi batas *no-slip* diasumsikan untuk persamaan aliran, yaitu kecepatan dinilai konstan, sementara tekanan memiliki kondisi batas gradien nol. Gambar 4 menyajikan konfigurasi *bearing* dengan kondisi batas *no-slip* dan *slip*. Konfigurasi ini memungkinkan pengaruh pemberian slip pada *textured bearing* dapat diteliti apakah menguntungkan apa tidak dilihat dari performansi bearing.



Gambar 4. Domain komputasi *textured bearing* untuk kondisi: (a) konvensional (tanpa slip), (b) slip

Kondisi batas yang digunakan pada kasus ini adalah:

- Kecepatan dinding atas  $U = 2 \text{ m/s}$
- Massa jenis pelumas  $\rho_l = 1000 \text{ kg/m}^3$
- Indeks konsistensi  $k = 0.044 \text{ kg}\cdot\text{s}^{n-2}/\text{m}$
- Indeks *power-law*  $n = 0.75$
- Viskositas dinamis minimal pelumas  $\eta_{min} = 0.001 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$
- Viskositas dinamis maksimal pelumas  $\eta_{max} = 1000 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$
- Tekanan sisi masuk  $P_{inlet} = 1 \text{ atm}$
- Tekanan sisi keluar  $P_{outlet} = 1 \text{ atm}$

Dalam simulasi ini, kondisi slip diaplikasikan di bagian *inlet* untuk mendapatkan performansi daya dukung beban terbaik [16]. Di daerah *inlet* dan *outlet* domain komputasi, tekanan ditetapkan sama dengan tekanan atmosfer. Asumsi gradien kecepatan nol dalam arah normal terhadap permukaan *sliding* digunakan untuk merepresentasikan aliran *fully developed*. Model aliran turbulen *k-e realizable* dan kondisi isothermal digunakan dalam analisa ini. Skema *second order upwind* diaplikasikan untuk diskretisasi momentum, sedangkan prosedur SIMPLE digunakan untuk *pressure-velocity coupling*.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Validasi

Hal pertama yang dilakukan dalam upaya menyelesaikan suatu permasalahan analisis adalah mencari suatu pembandingan. Pembandingan tersebut digunakan untuk melakukan suatu pengujian kelayakan hasil, yaitu dengan membandingkan hasil-hasilnya. Dari hasil validasi, diketahui hasil perhitungan ulang telah memenuhi syarat atau tidak. Klasifikasi memenuhi syarat jika hasil sudah mendekati dengan hasil perhitungan yang telah ada di beberapa literatur yang dijadikan acuan. Dalam penelitian ini, tulisan yang dijadikan acuan adalah hasil kerja Muchammad dkk [17]. Fokus perbandingan untuk validasi adalah fenomena kavitasasi dan pemodelannya secara numerik.

Tabel 2 menyajikan validasi hasil simulasi daya dukung beban (*load support*) seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Dari Tabel 2 dapat diambil kesimpulan bahwa pemilihan metode numerik dan pemodelan kavitasasi yang digunakan terbukti berhasil diaplikasikan dalam analisa hidrodinamika *textured bearing* mengingat perbedaan hasil yang relatif kecil.

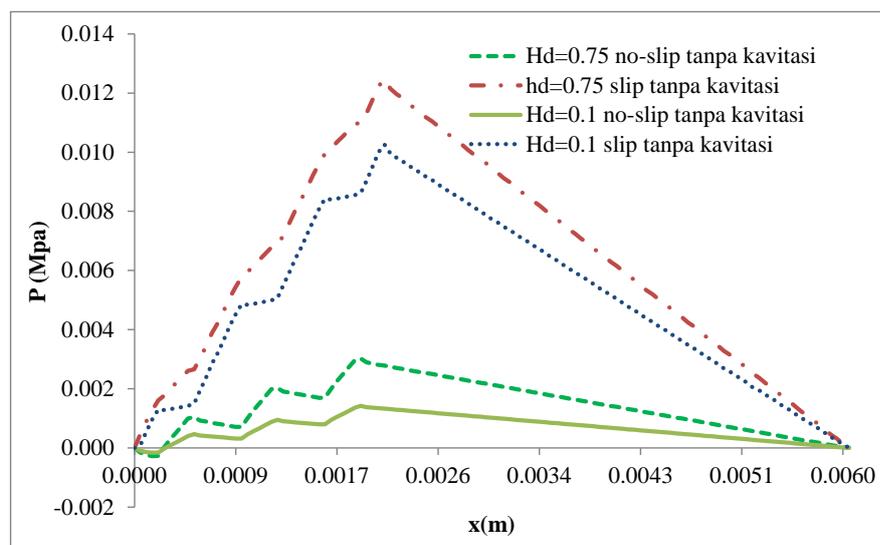
**Tabel 2.** Validasi daya dukung beban pada *slider bearing*

	$W$ (N)	$P_{max}$ (MPa)
<i>Present study</i>	48,050.48	4.55
Muchammad, dkk [11]	47,822.25	4.49
$\Delta$ (%)	4.7	1.4

### 4.2. Pengaruh kedalaman *dimple*, *slip*, dan kavitasasi

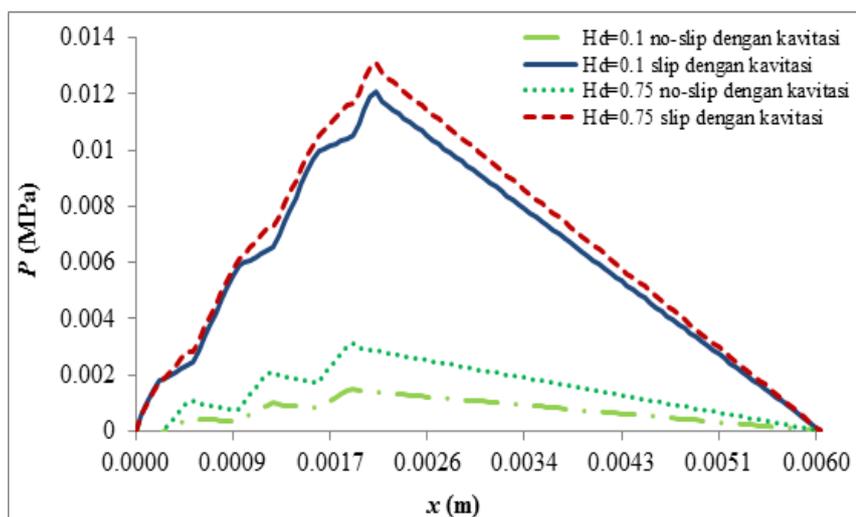
Dalam penelitian ini, ada 4 kasus yang akan diteliti untuk mengeksplorasi pengaruh kedalaman *dimple*, kondisi batas slip dan pemodelan kavitasasi. Kasus tersebut adalah (1) *bearing* konvensional (tanpa slip) dan tanpa kavitasasi, (2) *bearing* konvensional dengan mempertimbangkan model kavitasasi, (3) *bearing* dengan slip dan tanpa kavitasasi, (4) *bearing* dengan slip dan mempertimbangkan model kavitasasi. Kondisi batas slip diatur dalam *bearing* seperti tersaji dalam Gambar 4. Rekayasa kondisi slip ini seperti halnya pemberian tekstur sengaja dibuat di daerah inlet untuk mendapatkan performansi pelumasan maksimum.

Gambar 5 menyajikan distribusi tekanan hidrodinamik untuk keempat kasus yang diteliti dengan tidak memodelkan kavitasasi. Dengan kata lain, Persamaan 4-6 tidak dihitung dalam analisa CFD. Dari Gambar 5 ini dapat dilihat bahwa tekanan maksimum terjadi pada batas antara daerah bertekstur dengan yang tidak bertekstur. Hal ini seperti yang diprediksi semula, karena seperti diketahui bersama, gradien parameter fisik (tekanan hidrodinamik dalam kasus ini) akan bernilai maksimum jika terjadi perubahan geometri / penampang yang ekstrim. Hal yang menarik dari hasil simulasi ini adalah bahwa pemberian slip pada permukaan bertekstur memberikan kenaikan performansi tekanan hidrodinamik yang sangat signifikan untuk semua kedalaman tekstur yang menjadi bahan kajian disini jika dibandingkan dengan *textured-bearing* yang konvensional. Dengan kata lain, slip memberikan pengaruh yang dominan dalam menciptakan pelumasan yang optimal. Peningkatan performansi daya dukung beban dengan adanya slip bisa mencapai 4 kali lipat dibanding *bearing* tanpa slip untuk semua pola tekstur.. Sedangkan jika dilihat dari aspek pengaruh kedalaman tekstur, hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin besar kedalaman teksturnya, semakin besar pula distribusi tekanan hidrodinamik yang terjadi baik untuk kondisi slip maupun yang konvensional (tanpa slip), yang berarti berdampak pada makin besarnya daya dukung beban (*load support*).



**Gambar 5.** Distribusi tekanan untuk keempat kasus dimana kavitasasi tidak dipertimbangkan

Gambar 6 menyajikan distribusi tekanan hidrodinamik dengan mempertimbangkan model kavitas (Persamaan 5-7). Seperti halnya pada kondisi no-cavitation, pemberian slip mampu memberikan kenaikan tekanan hidrodinamik yang sangat signifikan, baik itu ketika dimple berkedalaman 0.1 maupun ketika 0.75. Hal ini akan membawa konsekuensi terhadap kenaikan daya dukung beban. Pemberian slip pada salah satu permukaan bearing menyebabkan gradien kecepatan di tiap titik di sepanjang permukaan kontak mengalami penurunan yang berimbas naiknya gradien tekanan dan menurunnya tegangan geser. Selain itu, adanya kavitas yang terjadi di area tertentu dalam dimple juga menyebabkan tekanan hidrodinamik menjadi lebih besar. Hal inilah yang menyebabkan mengapa prediksi tekanan hidrodinamik dan daya dukung beban ketika model kavitas dipertimbangkan menjadi lebih besar dibandingkan ketika tanpa mempertimbangkan kavitas. Tabel 3 menyajikan hasil perbandingan analisa CFD dengan dan tanpa melibatkan model kavitas untuk prediksi daya dukung beban dan gesekan untuk dua kedalaman tekstur yang berbeda. Tampak jelas bahwa prediksi CFD parameter daya dukung beban maupun gesekan dengan kavitas bisa mencapai 20 % lebih besar dibanding dengan analisa tanpa model kavitas baik untuk kondisi slip maupun tanpa slip. Dari sini dapat disimpulkan bahwa untuk analisa *textured bearing*, hasil yang akurat sesuai dengan kondisi fisik yang terjadi dapat dicapai bila pemodelan kavitas dipertimbangkan dalam perhitungan.



Gambar 6. Distribusi tekanan untuk keempat kasus dimana model kavitas dipertimbangkan

Tabel 3. Perbandingan prediksi performansi pelumasan dengan dan tanpa model kavitas

$H_d=0.75$	Slip		No-slip	
	W (N)	F (N)	W (N)	F (N)
Tanpa Kavitas	37.28	1.03	8.34	1.15
Kavitas	39.29	1.07	8.58	1.16
Perbedaan (%)	5	4	3	1
$H_d=0.1$	Slip		No-slip	
	W (N)	F (N)	W (N)	F (N)
Tanpa Kavitas	30.09	0.92	3.92	1.15
Kavitas	36.23	0.98	4.10	1.16
Perbedaan (%)	20	7	5	1

### 5. KESIMPULAN

Investigasi performansi pelumasan *bearing* dengan pelumas non Newtonian dilakukan dengan menggunakan analisa CFD (*computational fluid dynamic*). Fokus penelitian adalah pengaruh model kavitas dan slip terhadap performansi. Kasus yang diangkat adalah *textured bearing* dengan dua kedalaman tekstur yang berbeda. Kesimpulan yang dapat diambil dari simulasi numerik *textured bearing* berpelumas non Newtonian ini adalah sebagai berikut:

1. Pemberian slip pada *textured bearing* memiliki pengaruh yang signifikan dalam meningkatkan daya dukung beban.
2. Mengabaikan model kavitas dalam analisa *textured bearing* dapat membawa pengambilan kesimpulan yang salah. Hal ini dikarenakan perbedaan prediksi dengan dan tanpa model kavitas dapat mencapai 20 kali lipat.
3. Pemilihan kedalaman tekstur yang tepat untuk *textured bearing* membawa peningkatan performansi pelumasan.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi panduan ketika melakukan proses perancangan dan analisa *bearing* yang memiliki tekstur.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. V. V. L. N. Rao, "Theoretical Prediction of Journal Bearing Stability Characteristics Based on the Extent of the Slip Region on the Bearing Surface," *Tribol. Trans.*, vol. 52, no. 6, pp. 750–758, 2009.
- [2] M. J. Braun and W. M. Hannon, "Cavitation formation and modelling for fluid film bearings: a review," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, vol. 224, no. 9, pp. 839–863, 2010.
- [3] P. C. Mishra, "Mathematical modeling of stability in rough elliptic bore misaligned journal bearing considering thermal and non-Newtonian effects," *Appl. Math. Model.*, vol. 37, no. 8, pp. 5896–5912, 2013.
- [4] H. G. Elrod, "A Cavitation Algorithm," *J. Lubr. Technol.*, vol. 103, no. 3, p. 350, Jul. 1981.
- [5] S. K. Yadav and S. C. Sharma, "Performance of hydrostatic tilted thrust pad bearings of various recess shapes operating with non-Newtonian lubricant," *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 87, pp. 43–55, 2014.
- [6] J.-R. Lin, R.-F. Lu, L.-M. Chu, and C.-R. Hung, "The effects of non-Newtonian rheology in the dynamic coefficients of wide slider bearings with a secant-shaped film profile," *Ind. Lubr. Tribol.*, vol. 65, no. 6, pp. 351–356, Sep. 2013.
- [7] A. W. Pratomo, Muchammad, M. Tauviquirrahman, Jamari, and A. P. Bayuseno, "Tribological characteristic enhancement effects by polymer thickened oil in lubricated sliding contacts," in *AIP Conference Proceedings 1725*, 2016, vol. 20060, p. 20060.
- [8] M. Tauviquirrahman, W. K. Ajie, E. Yohana, M. Muchammad, and J. Jamari, "A Study of slip position on improving the hydrodynamic lubrication performance of single-textured bearing using a mass conserving numerical approach," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 913–921, 2016.
- [9] C. B. Khatri and S. C. Sharma, "Influence of textured surface on the performance of non-recessed hybrid journal bearing operating with non-Newtonian lubricant," *Tribol. Int.*, vol. 95, pp. 221–235, 2016.
- [10] M. Tauviquirrahman, Muchammad, R. Ismail, J. Jamari, and D. J. Schipper, "The Effect of a Hydrophobic Coating Material on Friction in a Micro-Slider Bearing: A Numerical Analysis," *Adv. Mater. Res.*, vol. 1123, pp. 42–45, 2015.
- [11] J. H. Choo, R. P. Glovnea, a. K. Forrest, and H. a. Spikes, "A Low Friction Bearing Based on Liquid Slip at the Wall," *J. Tribol.*, vol. 129, no. 3, p. 611, 2007.
- [12] J. H. Choo, H. A. Spikes, M. Ratoi, R. Glovnea, and A. Forrest, "Friction reduction in low-load hydrodynamic lubrication with a hydrophobic surface," *Tribol. Int.*, vol. 40, no. 2 SPEC. ISS., pp. 154–159, 2007.
- [13] ANSYS, *ANSYS Fluent, version 14.0: user manual*. ANSYS, Inc., Canonsburg, USA., 2011.
- [14] P. Zwart, A. Gerber, and T. Belamri, "A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics," in *Fifth International Conference on Multiphase Flow, Yokohama, Japan, May 30 - June 3, 2004*, no. 152.
- [15] M. Tauviquirrahman, Muchammad, Jamari, and D. J. Schipper, "Numerical Study of the Load-Carrying Capacity of Lubricated Parallel Sliding Textured Surfaces including Wall Slip," *Tribol. Trans.*, vol. 57, no. 1, pp. 134–145, 2014.
- [16] M. Tauviquirrahman, R. Ismail, J. Jamari, and D. J. Schipper, "A study of surface texturing and boundary slip on improving the load support of lubricated parallel sliding contacts," *Acta Mech.*, vol. 224, no. 2, pp. 365–381, 2013.
- [17] Muchammad, M. Tauviquirrahman, J. Jamari, and D. J. Schipper, "Load Support Improvement on Superhydrophobic Surface in Lubricated-MEMS Using Numerical Investigation," *Adv. Mater. Res.*, vol. 1123, pp. 3–6, 2015.