

Pengaruh Kekasaran Permukaan terhadap Performa *Slider Bearing* Bertekstur dengan Menggunakan Pendekatan CFD

Mohammad Tauviqirrahman*, Mufti M. Suryaman, Muchammad

Laboratorium Perancangan Teknik dan Tribologi, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: mtauviq99@yahoo.com

Abstract

In the traditional hydrodynamic lubrication theory, the assumption of perfectly smooth bearing surfaces is often adopted. However, it has been examined that such assumption is unrealistic because in general no surfaces are smooth. The present paper investigates the effect of surface roughness on the performance of textured slider bearing using CFD (computational fluid dynamic) approach. The multi-phase cavitation model is used to model cavitation phenomena in more real way. The performance of rough slider bearing is compared with a corresponding smooth slider bearing varying the inertia conditions. Based on the simulation results, it is found that hydrodynamic pressure and load support decrease with surface roughness. It is also highlighted that if the bearing is designed to have low inertia, the load support will become larger.

Keywords: CFD (Computational fluid dynamic), inertia, cavitation, surface roughness, lubrication

Abstrak

Dalam teori pelumasan klasik hidrodinamika, asumsi permukaan kontak *bearing* yang benar-benar halus sering kali digunakan. Meskipun demikian, telah dibuktikan bahwa asumsi tersebut tidak realistis dikarenakan pada umumnya, tidak ada permukaan *bearing* yang benar-benar halus. Tulisan ini membahas pengaruh kekasaran permukaan terhadap performa *slider bearing* bertekstur dengan menggunakan pendekatan CFD (*computational fluid dynamic*). Model kavitasi *multi-phase* digunakan untuk memodelkan fenomena kavitasi yang lebih riil. Performa *slider bearing* dengan tingkat kekasaran permukaan tertentu dibandingkan dengan *slider bearing* halus dengan menvariasikan kondisi inersia. Berdasarkan hasil simulasi, ditemukan bahwa tekanan hidrodinamik dan daya dukung beban berkurang dengan bertambahnya kekasaran permukaan. Selain itu, jika *bearing* dirancang agar memiliki kondisi inersia yang rendah, daya dukung beban akan menjadi lebih besar.

Kata kunci: CFD (*Computational fluid dynamic*), inersia, kavitasi, kekasaran permukaan, pelumasan

1. Pendahuluan

Salah satu komponen penting yang terdapat pada mesin yang berfungsi untuk menahan elemen mesin yang berputar adalah *bearing*. *Bearing* digunakan sebagai pemisah sebuah sumbu poros pada mesin agar tidak terjadi kontak antara poros dan penumpunya. Pelumas pada *bearing* ada berbagai jenis, salah satunya dengan menggunakan fluida.

Berdasarkan hasil penelitian yang ada, performa slider bearing berupa daya dukung beban dapat ditingkatkan dengan menambahkan tekstur pada permukaan bearing [1-4]. Meskipun demikian, pemberian tekstur ini ternyata juga memiliki efek lain pada pelumas yaitu memunculkan terjadinya fenomena kavitasi [5]. Kavitasi ini muncul karena adanya penurunan tekanan pada perubahan luas permukaan secara tiba-tiba pada bearing. Akibat dari kavitasi pada sebuah komponen adalah munculnya gelembung-gelembung udara yang sangat kecil dan menabrak permukaan yang bisa menyebabkan kerusakan komponen [1]. Dari penelusuran pustaka terkait dengan analisis pelumasan dalam bearing, asumsi permukaan bearing yang benar-benar halus masih sering digunakan. Padahal, berdasarkan teknologi pengukuran terbaru, terutama pada skala mikro, tidak ada satupun permukaan yang benar-benar halus bahkan ketika permukaan bearing tersebut sudah mengalami pemolesan (*polishing*) [6-8].

Atas dasar main-frame inilah dalam penelitian ini, pengaruh kekasaran permukaan terhadap performa pelumasan slider bearing bertekstur akan diteliti lebih lanjut terkait dengan pengaruh adanya kavitasi. Dalam penelitian ini, model kavitasi multi-phase digunakan. Model ini memungkinkan perubahan fasa pelumas dapat dihitung sehingga kondisi riil operasi bearing menjadi lebih representatif dibanding menggunakan model yang lain. Selain itu, pola geometri tekstur pada bearing juga divariasikan untuk menciptakan efek inersia.

2. Material dan metode penelitian

2.1. 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:

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

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

2.2. Pemodelan kekasaran permukaan

Dalam penelitian kali ini, kekasaran permukaan dimodelkan sebagai *uniform sand-grain* yang dinotasikan dengan parameter ketinggian kekasaran K_s . Menurut Adams dkk. [9], hubungan antara K_s and R_a (kekasaran rata-rata aritmetik) dapat ditulis sebagai berikut:

$$K_s = 5.863 R_a \quad (3)$$

2.3. Pemodelan kavitasi

Untuk mencapai hasil yang lebih akurat, model kavitasi *multi-phase* digunakan. Dalam model ini, perubahan fasa dari liquid ke uap air dimungkinkan. Transfer massa liquid-uap air (evaporasi dan kondensasi) dimodelkan dengan menggunakan persamaan transport uap air [10]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \mathbf{v}) = R_g - R_c \quad (4)$$

dimana α_v adalah fraksi volume *vapour* dan ρ_v adalah densitas vapor. R_g dan R_c merujuk kepada transfer massa antara fasa liquid dan fasa *vapour* dalam kavitasi. Untuk model Zwart-Gelber-Belamri, bentuk akhir persamaan kavitasi adalah sebagai berikut [10]:

Jika $p \leq p_v$,

$$\text{maka } R_g = F_{evap} \frac{3\alpha_{nuc} (1 - \alpha_v) \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2 P_v - P}{3 \rho_\ell}} \quad (5)$$

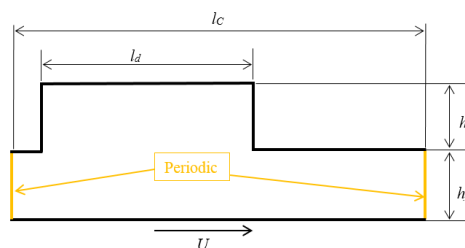
Jika $p \geq p_v$,

$$\text{maka } R_c = F_{cond} \frac{3\alpha_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2 P - P_v}{3 \rho_\ell}} \quad (6)$$

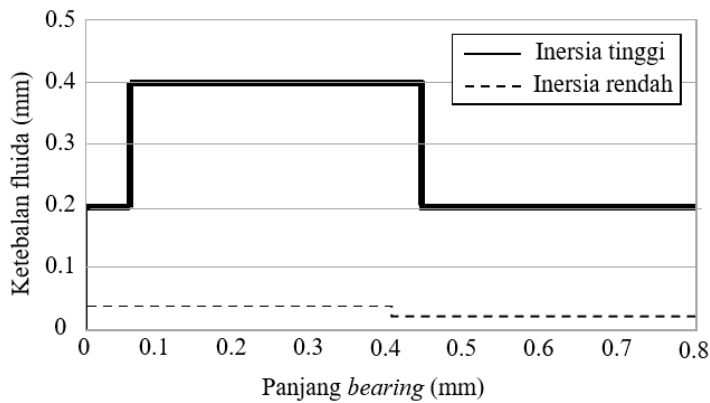
dimana F_{evap} = koefisien evaporasi = 50, F_{cond} = koefisien kondensasi = 0.01, R_B = radius gelembung-gelembung udara = 10^{-6} m, α_{nuc} = fraksi volume situs nukleasi = 5×10^{-4} , ρ_ℓ = densitas liquid dan p_v = tekanan uap air.

2.4. CFD model

Gambar 1 menunjukkan skema slider bearing bertekstur dengan satu sel tekstur yang diadopsi dari hasil penelitian Dobrica dan Fillon [11]. Dalam simulasi kali ini, untuk memvariasikan pengaruh kondisi inersia, ada dua pola slider bearing bertekstur yang digunakan, yaitu pola dengan pengaruh inersia tinggi ($\lambda = 2$, $Re = 57.3$), dan pola dengan pengaruh inersia rendah ($\lambda = 20$, $Re = 5.73$). Re adalah bilangan Reynolds dan λ adalah aspek rasio tekstur ($\lambda = l_d/h_d$). Untuk kedua pola, diasumsikan bahwa texture density (l_d/l_c) adalah konstan sebesar 0.5, dan relative dimple depth (l_d/h_d) adalah sebesar 1.0. Dengan asumsi tersebut, l_c dan l_d pada kedua pola dibuat konstan, yakni $l_c = 0.8$ mm serta $l_d = 0.4$ mm. Untuk simulasi bearing ini, kondisi batas periodik digunakan pada sisi inlet dan outlet seperti ditunjukkan dalam Gambar 1. Sedangkan perbandingan dua pola bearing yang berbeda keadaan inersia ini disajikan dalam Gambar 2. Adapun pendefinisian fasa secara detil disajikan dalam Tabel 1.



Gambar 1. Skema slider bearing bertekstur (Catatan: h_d = ketebalan tekstur, h_f = ketebalan film pelumas, l_d = panjang tekstur, l_c = panjang zona bertekstur, U = kecepatan sliding)



Gambar 2. Perbandingan pola geometri bearing dengan dua kondisi inersia yang berbeda

Tabel 1. Pendefinisian fasa

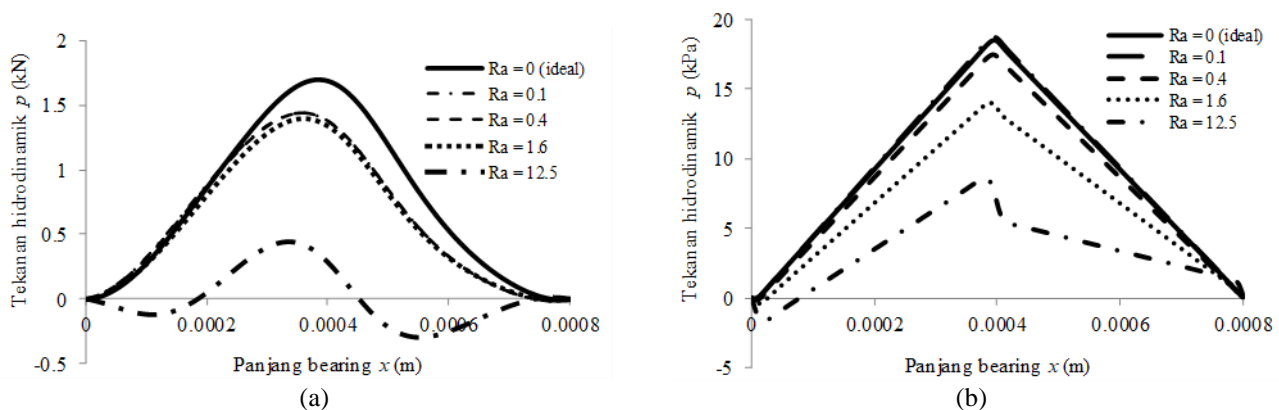
No.	Parameter	Nilai
1	Densitas pelumas ρ	860 kg/m ³
2	Viskositas dinamis pelumas η	0.03 Pa-s
3	Densitas uap air ρ_{vap}	1.256x10 kg/m ³
4	Viskositas uap air η_{vap}	0.02556 Pa-s

Dalam penelitian kali ini, untuk analisis pengaruh kekasaran permukaan, di sepanjang daerah dinding atas *slider bearing* (Gambar 1), kondisi kekasaran permukaan dengan tingkat tertentu diaplikasikan. Ada 4 tingkat kekasaran permukaan yang dipilih, yaitu $R_a = 0.1 \mu\text{m}$ (sangat halus), $R_a = 0.4 \mu\text{m}$ (halus), $R_a = 1.6 \mu\text{m}$ (medium), dan $R_a = 12.5 \mu\text{m}$ (kasar). Sedangkan dinding bagian bawah *slider bearing* merupakan bagian yang bergerak dengan kecepatan sesuai bilangan Reynoldsnnya. Bagian atas serta area tekstur pada *slider bearing* merupakan bagian permukaan yang diam.

Solusi numerik. Dalam simulasi ini, mesh yang digunakan adalah *quadrilateral* dengan jumlah nodal 15.000 dan 30.000 berturut-turut untuk pola bearing dengan inersia tinggi dan inersia rendah. 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*.

3. Hasil dan pembahasan

Akhir-akhir ini, kavitasi telah menjadi bahan kajian penelitian yang cukup intensif di berbagai kalangan peneliti, baik dari segi pemodelan matematisnya maupun fenomena fisiknya. Hal ini dikarenakan kavitasi dapat membawa pengaruh yang positif maupun negatif terhadap performa sistem mekanik (dalam kasus ini *bearing*). Asumsi pengabaian kavitasi dalam desain dan analisis pelumasan terbukti bisa mengakibatkan hasil kajian menjadi kurang akurat dan mendorong terjadinya pengambilan kesimpulan yang salah, terutama untuk *bearing* dengan perubahan geometri permukaan yang ekstrim seperti adanya tekstur yang dalam [11-12]. Oleh karena itulah, dalam penelitian ini, terkait dengan analisis pengaruh kekasaran permukaan terhadap performa *slider bearing*, dua pendekatan analisis pelumasan akan dilakukan, yaitu pertama, analisis dengan mempertimbangkan model kavitasi (Pers. 5 dan 6), dan kedua, analisis yang tidak memperhitungkan model kavitasi.

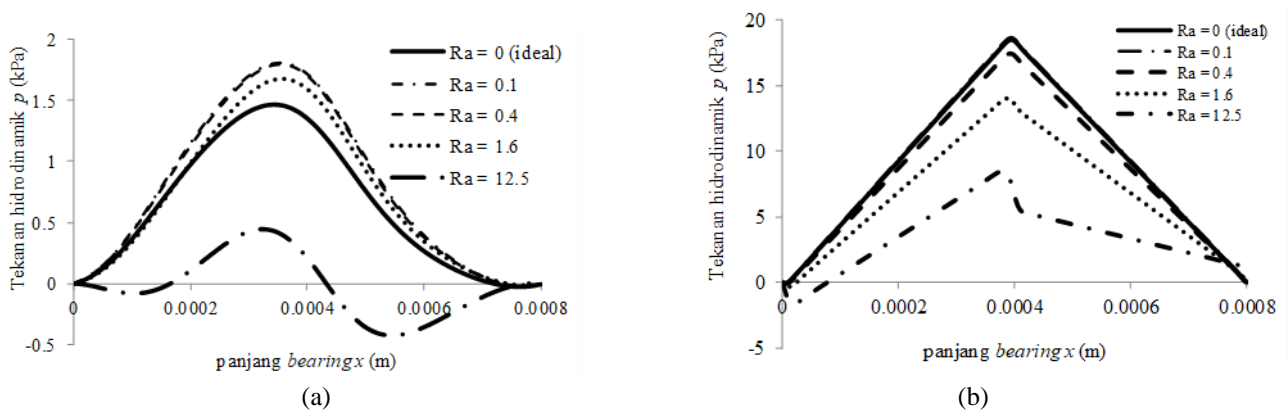


Gambar 3. Distribusi tekanan hidrodinamik tanpa memperhitungkan model kavitasi untuk kasus: (a) inersia tinggi, (b) inersia rendah

Dalam penelitian ini, ada dua karakteristik performa hidrodinamik *slider bearing* yang dibahas, yaitu tekanan hidrodinamik p dan daya dukung beban W (*load support*). Daya dukung beban diperoleh dari hasil integral distribusi tekanan hidrodinamik di sepanjang permukaan kontak. Gambar 3 menunjukkan distribusi tekanan hidrodinamik pada berbagai tingkat kekasaran permukaan ($R_a = 0.1 \mu\text{m}$, $R_a = 0.4 \mu\text{m}$, $R_a = 1.6 \mu\text{m}$, $R_a = 12.5 \mu\text{m}$) untuk dua pola *bearing* yang berbeda (inersia tinggi vs inersia rendah) dengan tidak mempertimbangkan model kavitas.

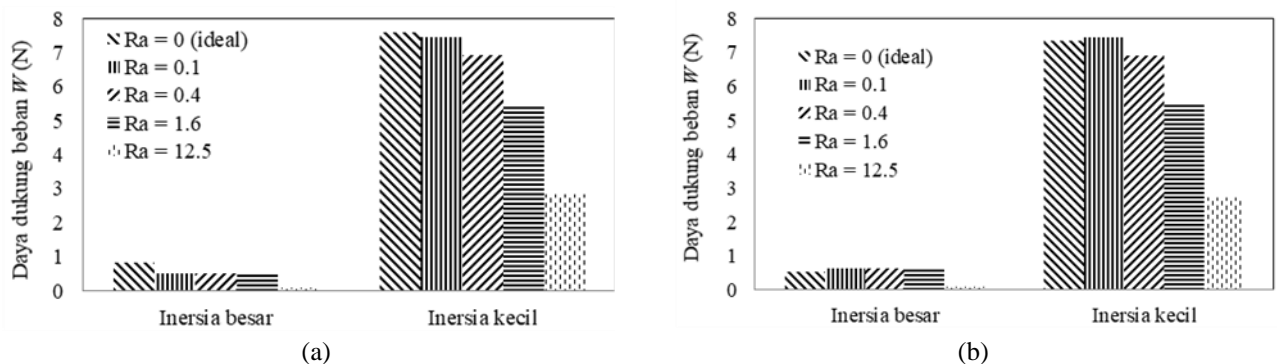
Dari Gambar 3 ini tampak bahwa tingkat kekasaran permukaan yang diaplikasikan akan sangat berpengaruh terhadap distribusi tekanan pada *slider bearing* baik itu yang berpola “inersia tinggi” maupun yang berpola “inersia rendah”. Untuk kedua pola *bearing*, ditemukan bahwa semakin tinggi nilai R_a yang diaplikasikan yang berarti semakin kasar permukaan *slider bearing*, maka akan semakin turun distribusi tekanan hidrodinamik yang dihasilkan. Sebagai contoh, untuk *bearing* yang kasar ($R_a = 12.5 \mu\text{m}$) dengan pola inersia rendah (Gambar 3(b)), tekanan hidrodinamik maksimum turun sebesar 137% jika dibandingkan dengan *bearing* ideal ($R_a = 0$). Hal ini menandakan bahwa dalam proses pembuatan *bearing* bertekstur, jika *finishing* untuk permukaan kontak nya tidak dilakukan secara hati-hati, maka ternyata bisa menurunkan performa *slider bearing*.

Gambar 3 juga menunjukkan bahwa terkait dengan pengaruh inersia, ketika *bearing* didesain agar memiliki inersia yang kecil (dengan cara mengatur agar R_e kecil dan λ besar), maka distribusi tekanan hidrodinamik menjadi jauh lebih besar jika dibanding *bearing* dengan pola “inersia besar”. Dengan kata lain, dalam kasus ini, inersia membawa pengaruh negatif terhadap performa *bearing*.



Gambar 4. Distribusi tekanan hidrodinamik dengan mempertimbangkan model kavitas untuk kasus: (a) inersia tinggi, (b) inersia rendah

Untuk analisis pelumasan yang memperhitungkan model kavitas, hasil simulasi distribusi tekanan hidrodinamik ditunjukkan dalam Gambar 4. Secara umum, jika dibandingkan dengan Gambar 3, ditemukan bahwa tekanan hidrodinamik yang dihasilkan dengan memperhitungkan model kavitas menjadi lebih kecil untuk semua nilai kekasaran permukaan dan semua pola. Dari sudut pandang fisik, ini menandakan bahwa keberadaan kavitas (gelembung-gelembung gas pada skala mikro) memberikan pengaruh negatif terhadap performa *slider bearing*. Pengaruh ini akan signifikan untuk *bearing* dengan inersia besar dan tidak terlalu signifikan untuk *bearing* dengan inersia kecil seperti diperlihatkan lebih detail pada Gambar 5.



Gambar 5. Perbandingan daya dukung beban untuk kasus: (a) tanpa model kavitas, (b) dengan model kavitas

Gambar 5 menyajikan perbandingan daya dukung beban untuk dua pola *bearing* bertekstur (inersia besar vs inersia) untuk dua kondisi (kavitas vs tanpa model kavitas). Ada beberapa karakteristik daya dukung beban yang diperoleh dari Gambar 5 ini, yaitu, pertama, untuk kasus inersia kecil, perbedaan antara hasil analisis yang mempertimbangkan kavitas dan yang tidak mempertimbangkan model kavitas relatif sangat kecil (kurang dari 4%). Dari sudut pandang

fisik, ini menandakan bahwa kavitasinya sebenarnya tidak terjadi pada *bearing* dengan inersia kecil. Kedua, untuk kasus *bearing* inersia besar, ada perbedaan prediksi daya dukung beban yang cukup signifikan, berkisar antara 15 – 37% tergantung dari nilai kekasaran antara analisis “kavitasinya vs tanpa kavitasinya”. Dapat dikatakan bahwa terkait dengan Gambar 3 dan 4, untuk *bearing* dengan inersia besar, fenomena kavitasinya dalam pelumas menyebabkan penurunan karakteristik hidrodinamika yang cukup signifikan.

4. Kesimpulan

Dalam penelitian ini, pengaruh kekasaran permukaan terhadap performa pelumasan *slider bearing* telah diinvestigasi. Dua jenis *bearing* yang berbeda kondisinya menjadi bahan kajian. Pengaruh pemodelan kavitasinya dalam analisis juga telah diteliti. Dari hasil simulasi, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut: (a) Kekasaran permukaan memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap tekanan hidrodinamik dan daya dukung beban. Makin besar tingkat kekasaran permukaan, makin berkurang daya dukung beban yang ditimbulkan. (b) *Bearing* bertekstur dengan pola desain inersia kecil menghasilkan performansi pelumasan yang jauh lebih baik dibanding pola desain inersia besar, karena ketiadaan kavitasinya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi panduan ketika melakukan proses manufaktur *slider bearing* terkait dengan hasil *finishing* permukaan kontak *bearing*.

Daftar Pustaka

- [1] Cupillard, S., Glavatskih, S. and Cervantes, M.J., 2008. “Computational fluid dynamics analysis of a journal bearing with surface texturing,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 222: 97–107.
- [2] Cupillard, S., Glavatskih, S. and Cervantes, M.J., 2010. “Inertia effects in textured hydrodynamic contacts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 224(8): 751–756.
- [3] Rao, T.V.V.L.N., Rani, A.M.A., Nagarajan, T., and Hashim, F.M., 2012. “Analysis of slider and journal bearing using partially textured slip surface,” *Tribology International*, 56: 121–128.
- [4] Tauviquirrahman, M., Muchammad, Jamari and Schipper, D.J., 2014. “Numerical study of the load carrying capacity of lubricated parallel sliding textured surfaces including wall slip,” *Tribology Transactions*, 57(1): 134–145.
- [5] Shi, X. and Ni, T., 2011. “Effects of groove textures on fully lubricated sliding with cavitation,” *Tribology International*, 44(12): 2022–2028.
- [6] Gururajan, K. and Prakash, J., 2001. “Roughness effects in narrow porous journal bearing with arbitrary porous wall thickness,” *International Journal of Mechanical Sciences*, 44: 1003–1016.
- [7] Naduvinamani, N.B., Hiremath, P.S. and Gurubasavaraj, G., 2002. “Effects of surface roughness on the static characteristics of rotor bearings with couple stress fluids,” *Computer & Structures*, 80: 1243–1253.
- [8] Kalavathi, G.K., Dinesh P.A. and Gururajan, K., 2016. “Influence of roughness on porous finite journal bearing with heterogeneous slip/no-slip surface,” *Tribology International*, 102: 174–181.
- [9] Adams T. and Grant, C., 2012. “A Simple algorithm to relate measured surface roughness to equivalent sand-grain roughness,” *International Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics*, 1: 66–71.
- [10] Zwart, P. Gerber, A. and Belamri, T., 2004. “A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics,” *Fifth International Conference on Multiphase Flow*, Yokohama, Japan, May 30 - June 3, 2004, no. 152.
- [11] Dobrica, M.B., Fillon, M., Pascovici, M.D. and Cicone, T., 2010. “Optimizing surface texture for hydrodynamic lubricated contacts using a mass-conserving numerical approach,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 224(8): 737–750.
- [12] Tauviquirrahman, M., Yohana, E. dan Hakim, A.R., 2016. “Analisa numerik pemberian slip dan tekstur untuk peningkatan performansi pelumasan pada *bearing*,” *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XV PM-018*, 897-903, Bandung 5-6 Oktober 2016, Institut Teknologi Bandung.