

Kaji Numerik Pengaruh Beban Dinamik Terhadap Tekanan dan Ketebalan Lapisan Film pada *Cylindrical roller Bearing* Menggunakan Metode Beda Hingga

Afriadham Putra¹, Dedi Rosa Putra Cupu², Nazaruddin³

Konstruksi dan Perancangan, Teknik Mesin, Universitas Riau

¹afriadham.putra2352@student.unri.ac.id, ²dedi.cupu@lecturer.unri.ac.id, ³nazaruddinyok@gmail.com

ABSTRACT

Roller bearings are one type of bearing (cylindrical) that uses a roll or cylindrical shape as a friction damper on the bearing. The biggest factor influencing the performance of roller bearings is the dynamic load. One source of dynamic load on a bearing is vibration. This study examines how the influence of dynamic loads on the thickness of the film layer formed and the pressure that occurs in contact between the cylindrical roller and the inner ring. The dynamic load studied in this study is the fluctuation of the load generated by external influence of vibration, which theoretically changes the actual load acting on the sinusoidal fluctuating bearings. The simulation begins with a static load condition, the results of this static simulation are used for dynamic load simulation in solving the Reynolds transient equation where the influence of time cannot be ignored anymore. The finite difference method with a central-difference scheme is used to solve the Reynolds equation. The results showed the thickness of the film layer and the pressure that occurs changes every time. The greater the amplitude of the excitation the greater the pressure applied to the contact, the thinner the film formed. The frequency of excitation affects the number of repetitions of loads that work at one particular time.

Keywords: Transient Elastohydrodynamic Lubrication, Roller Bearings, Dynamic Loads, Amplitude, Frequency

1. Pendahuluan

Pada era industri 4.0 yang memaksa manusia untuk terus mengembangkan alat yang lebih *modern* guna menunjang kebutuhan dunia, dibutuhkan suatu perubahan dalam pengetahuan dan teknologi. Hal tersebut sangatlah penting mengingat banyaknya perusahaan-perusahaan industri yang menggunakan komponen alat disetiap bidang. Salah satu komponen tersebut ialah *bearing*. *Bearing* merupakan salah satu bagian dari elemen mesin yang memegang peranan cukup penting karena fungsi dari *bearing* yaitu untuk menumpu sebuah poros agar poros dapat berputar tanpa mengalami gesekan yang berlebihan. *Bearing* harus cukup kuat untuk memungkinkan poros serta elemen mesin lainnya bekerja dengan baik. Kemampuan *bearing* dalam menurunkan gesekan tergantung dari beberapa faktor, yaitu: kekasaran permukaan dari *metal balls* atau *roller*, kehalusan dari *inner surface* dan *outer surface* untuk melawan perputaran dari *balls* atau *roller* tersebut. *Balls* dan *roller* berfungsi menerima beban yang diterima dari luar.

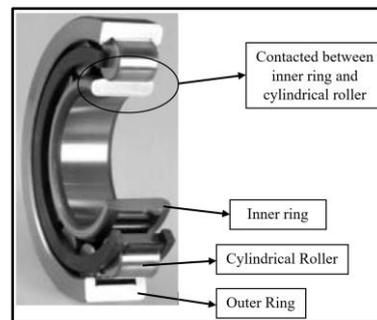
Berputarnya *bearing* mengakibatkan timbulnya gesekan yang akan menyebabkan keausan pada permukaan yang saling mengalami kontak, yakni *roller element* dengan *inner ring*, dan *roller element* dengan *outer ring*. Semakin lama kontak itu terjadi, maka permukaan dari

roller element, *inner ring* dan *outer ring* akan mengalami kecacatan, sehingga akan timbul suatu masalah. Pada permasalahan ini, pemberian *lubricant* (pelumas) menjadi solusi untuk mengurangi gesekan dan juga keausan yang terjadi. *Lubricant* akan membentuk lapisan *film* pada setiap celah antar permukaan yang mengalami kontak dengan ketebalan yang beragam. Lapisan *film* ini akan mengurangi gesekan yang terjadi, sehingga laju keausan dapat diminimalisir.

Mengenai ketebalan lapisan film, banyak faktor yang mempengaruhinya, antara lain besarnya beban yang bekerja, kecepatan putaran *bearing*, serta jenis pembebanan pada *bearing*. Beban yang bekerja pada *bearing* menjadi salah satu faktor dalam penentuan ketebalan lapisan *film*. Semakin besar beban yang bekerja pada *cylindrical roller bearing*, maka ketebalan lapisan *film* juga akan semakin tipis. *Line contact* ialah salah satu jenis jejak pembebanan yang berupa garis (persegi panjang) pada dasar permukaan kontak (*base contact*) yang ditimbulkan dari *roller element*. Kecepatan putaran *bearing* juga menjadi hal yang sangat berpengaruh terhadap lapisan *film*. Ketika kecepatan meningkat, lapisan *film* menjadi lebih tebal secara signifikan di sepanjang sumbu rol. Dengan kata lain, perbedaan antara ketebalan lapisan *film* di bagian tengah dan ujung

roller menjadi lebih besar. Sehingga kecepatan yang tinggi dapat menghasilkan lapisan *film* yang lebih tebal, akan tetapi dapat menyebabkan distribusi tidak merata dari ketebalan lapisan *film* yang ada disepanjang sumbu *roller*. Namun, pengaruh kecepatan pada tekanan jauh lebih sedikit dan hampir sama dengan kontak ideal pada EHL [1]. *Elastohydrodynamic Lubrication* (EHL) adalah bagian dari pelumasan *hydrodynamic* dimana deformasi elastis dari benda padat yang saling berkontak mempunyai peranan penting dalam pelumasan *hydrodynamic*. Hampir semua kontak EHL beroperasi dalam kondisi dimana beban, kecepatan permukaan berubah seiring waktu. Beban berubah secara terus-menerus ketika *ball* atau *roller* berputar, akan tetapi dapat berubah lebih cepat jika beban eksternal berubah [2]. Deformasi elastis sendiri merupakan perubahan bentuk yang terjadi pada suatu benda saat gaya atau beban bekerja, dan perubahan bentuk akan hilang ketika gaya atau bebannya diiadakan. Artinya, bila beban diiadakan, maka benda akan kembali ke bentuk dan ukuran semula. Jika ditinjau dari segi pembebanan yang merupakan salah satu pengaruh ketebalan lapisan *film*, *bearing* akan mengalami defleksi. Defleksi tersebut disebabkan oleh gaya yang bekerja pada poros atau *shaft*. Selain itu, getaran yang terjadi juga akan berpengaruh terhadap pembebanan pada *bearing*. Getaran yang berlebih dapat menyebabkan kerusakan pada *bearing*. Kerusakan yang tidak terpantau pada *bearing* sangat membahayakan kinerja dari mesin ketika beroperasi. Gaya radial yang bekerja pada *bearing* akan menyebabkan *load zone* sehingga mempengaruhi kekakuan dari *bearing* itu sendiri. Maka kekakuan suatu *bearing* dapat ditentukan dengan mengubah besar gaya radial yang bekerja sehingga *load zone* dan defleksi akan berubah [3].

Pada simulasi ini, *cylindrical roller bearing* akan digunakan sebagai objek kajian seperti yang tertera pada gambar 1. Gambar 1 merupakan kontak antara *cylindrical rolling element* dengan *inner ring*. Sementara untuk tabel 2 merupakan spesifikasi dari *cylindrical roller bearing*. Dengan melakukan pembatasan masalah, seperti studi kasus analisis dilakukan pada *cylindrical roller bearing*, temperatur dan *lubricant* diasumsikan tetap.



Gambar 1 *Cylindrical roller bearing* [4]

Tabel 1 menampilkan data *lubricant* yang akan digunakan dalam penelitian.

Tabel 1 *Lubricants properties* [5]

No	Data	Nilai	Satuan
1	Density 15°C	0,8663	g/cm ³
2	Kinematic Viscosity 40°C	28,6	mm ² /s
3	Dynamic Viscosity 40°C	24,77	mm ² /s
4	Pressure Viscosity Coefficient	12,65	GPa ⁻¹

Tabel 2 *Physical parameter cylindrical roller bearing* [6]

Material	Steel: AISI 52100
Elastic Modulus (E)	210 GPa
Poisson's ratio (ν)	0,3
Roller radius (R)	6,612 mm

2. Persamaan

Persamaan yang digunakan pada penelitian ini dibuat dalam bentuk *dimensionless*. Persamaan *dimensionless* Reynolds dapat dituliskan sebagai berikut [7]:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + u \frac{\partial d}{\partial x} + \frac{\partial d}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

Persamaan *dimensionless* ketebalan lapisan *film* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$H(X) = H_0 + \frac{X^2}{2} - \frac{1}{\pi} \int_{X_0}^{X_e} \ln|X - X'| p(X') dX' \quad (2)$$

Persamaan *dimensionless* densitas (ρ) dituliskan sebagai berikut:

$$\rho = \left(1 + \frac{0,6p}{1+1,7p} \right) \quad (3)$$

Untuk kalkulasi viskositas (η), persamaan *viscosity-pressure* yang digagas oleh Roelands digunakan pada simulasi ini

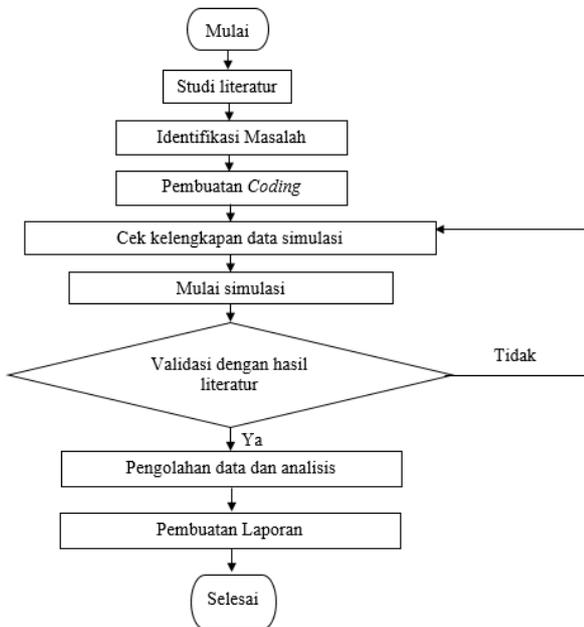
$$\eta = \eta_0 \exp\{(\ln \eta_0 + 9,67)[(1 + 5,1 \times 10^{-9} p)^{0,68} - 1]\} \quad (4)$$

Persamaan *dimensionless force balance* dapat dituliskan sebagai berikut:

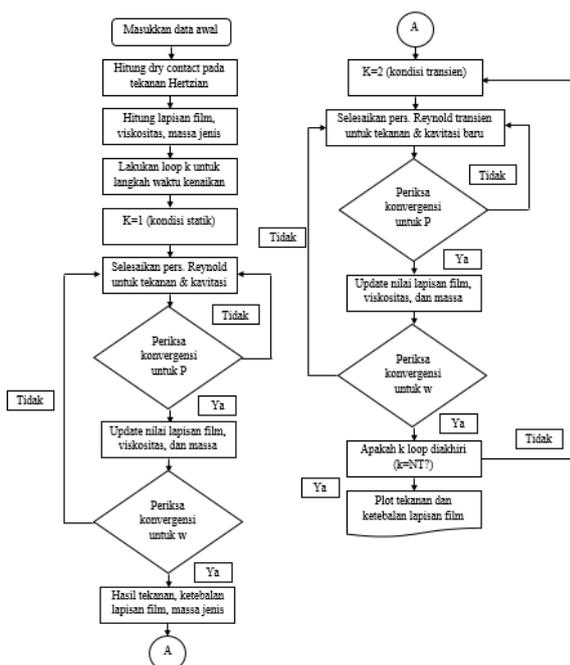
$$\int_{X_0}^{X_e} P dX = \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

3. Metodologi

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode kajian numerikal (*numerical study*) yaitu metode yang menerapkan proses iterasi dalam penyelesaian suatu permasalahan dan memiliki atau terdapat persentase *error* pada iterasi tersebut. Secara garis besar metode dan mekanisme penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2 dan gambar 3.



Gambar 2 Diagram alir penelitian



Gambar 3 Diagram alir simulasi

4. Hasil dan Pembahasan

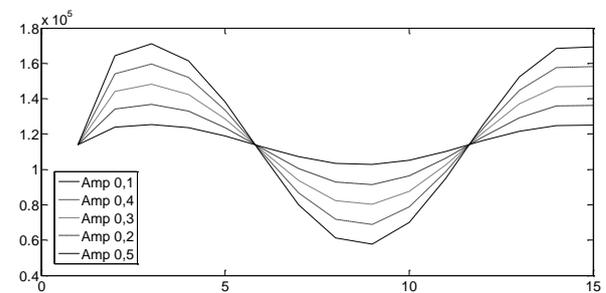
Pada penelitian ini mengkaji bagaimana pengaruh beban dinamik divariasikan terhadap beban dengan amplitudo dan frekuensi yang

berbeda. Untuk jenis *lubricant* yang digunakan pada properties adalah jenis mineral oil. Sementara jenis *bearing* yang digunakan dalam simulasi yaitu *bearing* SKF NU 310 ECP dengan *properties* dan parameter yang juga telah dipaparkan sebelumnya. Dari data-data ini nantinya akan diinputkan kedalam program sehingga bisa didapatkan hasil simulasi yang diinginkan.

Pada simulasi program terdapat 2 variasi yang dilakukan dalam mencari beban dinamik, yaitu variasi eksitasi amplitudo dan juga variasi eksitasi frekuensi.

a. Variasi eksitasi amplitudo

Tekanan dan juga ketebalan lapisan film disebabkan oleh adanya beban eksitasi sinusoidal secara berkala. Yang mana efek eksitasi frekuensi pada tekanan dan ketebalan lapisan film dengan F sebesar 114 kN/m dan kecepatan putar *roller* sebesar 5,8 m/s. Frekuensi eksitasi ditetapkan konstan sebesar 2π . Pengaruh amplitudo eksitasi tersebut pada beban aktual dapat dilihat pada gambar 4.



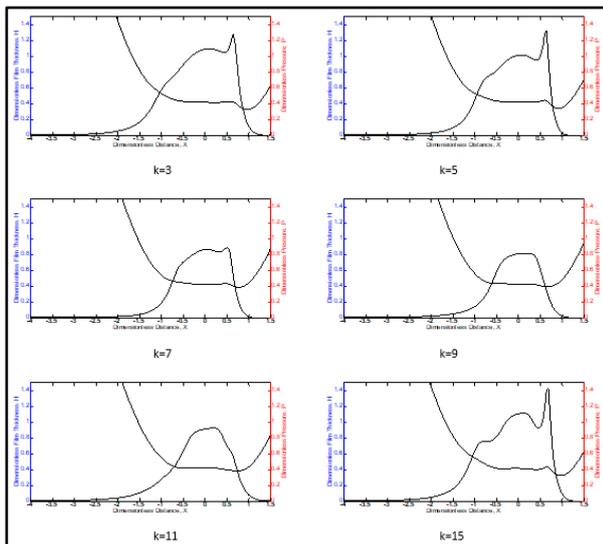
Gambar 4 Variasi amplitudo terhadap beban aktual, sumbu x: waktu (*millisecond*) dan sumbu y: beban aktual (kN/m)

Tabel 3 Hasil simulasi dengan Amp=0,3 dan Freq= 2π

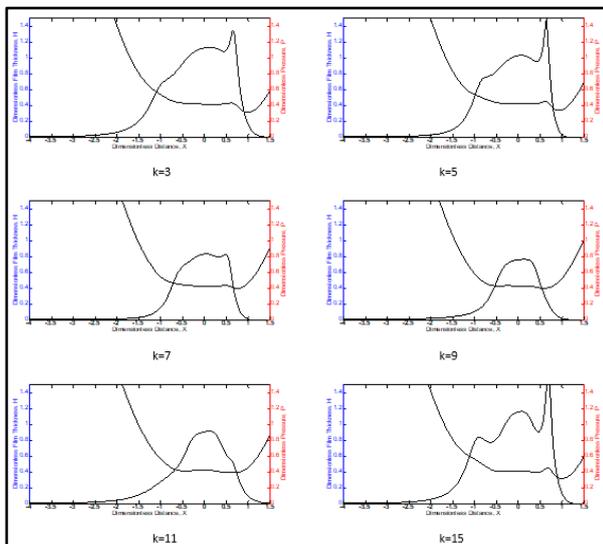
No.	A	Freq	k	Pmax	Hmin	Hcent
1	0,3	2π	3	1,2809	0,3232	0,5236
2			5	1,4111	0,3219	0,5265
3			7	1,4111	0,3219	0,5220
4			9	1,4111	0,3219	0,5241
5			11	1,4111	0,3219	0,5297
6			15	1,4289	0,3219	0,5234

Tabel 4 Hasil simulasi dengan Amp=0,4 dan Freq=2 π

No.	A	Freq	k	Pmax	Hmin	Hcent
1			3	1,3526	0,3134	0,5227
2			5	1,5091	0,3108	0,5261
3	0,4	2 π	7	1,5091	0,3108	0,5336
4			9	1,5091	0,3108	0,5365
5			11	1,5091	0,3108	0,5298
6			15	1,7200	0,3108	0,5215



Gambar 5 Dimensionless tekanan dan ketebalan lapisan film untuk F=114 kN/m, rolling speed=5,8 m/s, Amp=0,3, Freq=2 π



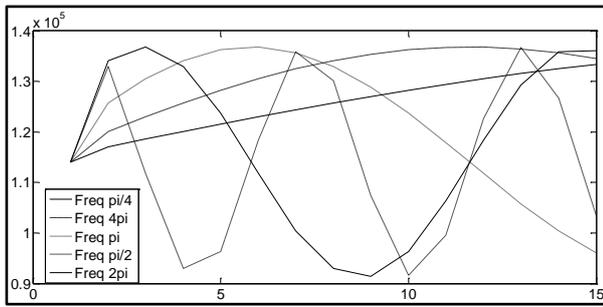
Gambar 6 Dimensionless tekanan dan ketebalan lapisan film untuk F=114 kN/m, rolling speed=5,8 m/s, Amp=0,4, Freq=2 π

Gambar 5 dan gambar 6 menunjukkan bentuk lapisan film dan distribusi tekanan yang terjadi selama waktu tertentu untuk beberapa variasi amplitudo eksitasi dimana nilai frekuensi eksitasinya adalah tetap, sebesar 2 π . Tabel 3 sampai tabel 4 menunjukkan nilai tekanan maksimum yang terjadi serta nilai ketebalan lapisan film minimum (Hmin) dan nilai lapisan film pada bagian tengah kontak (Hcen) untuk variasi amplitudo eksitasi pada rentang waktu tertentu.

Gambar 5 dan gambar 6 menunjukkan bahwa terjadi peningkatan dan juga perubahan pada grafik yang diplot. Dengan frekuensi yang tetap dan amplitudo yang bervariasi, menimbulkan suatu perubahan pada ketebalan lapisan film dan juga tekanan karena timbulnya getaran yang tidak menentu. Ini menandakan bahwa terdapat beberapa efek beban dinamis transien pada perilaku *Elastohydrodynamic Lubrication* (EHL). Jika dilihat secara bersamaan gambar 5 dan gambar 6 mengalami perubahan bentuk grafik yang cukup besar. Efek eksitasi amplitudo sangat terlihat pada gambar 5 dan gambar 6. Pada grafik ini menunjukkan perubahan besar pada tekanan dan ketebalan lapisan film. Hal ini tentu tidak lepas karena adanya beban sinusoidal yang bervariasi ketika melakukan running pada program. Pada gambar ini, dapat dilihat bahwa perubahan tekanan dan ketebalan lapisan film mengalami perubahan besar dikarenakan adanya getaran yang terjadi. Karena beban yang diterapkan adalah berupa sinusoidal, maka perubahan pada lapisan film dan distribusi tekanan yang terjadi akan berulang secara berkala. Disisi lain, area transisi dari zona *inlet* ke *outlet* akan terjadi pengecilan area permukaan sehingga tekanan menjadi naik, hal tersebut dinamakan *pressure spike*, hal ini dapat terjadi akibat hubungan eksponensial antara viskositas dan tekanan.

b. Variasi eksitasi frekuensi

Sama halnya dengan variasi eksitasi amplitudo, pada variasi eksitasi frekuensi tekanan dan juga ketebalan lapisan film disebabkan oleh adanya beban eksitasi sinusoidal secara berkala. Yang mana efek eksitasi frekuensi pada tekanan dan ketebalan lapisan film dengan F sebesar 114 kN/m dan kecepatan putar roller sebesar 5,8 m/s. Untuk mengetahui eksitasi frekuensi, amplitudo eksitasi ditetapkan konstan sebesar 0,2 sedangkan frekuensi eksitasi divariasikan. Berikut adalah pengaruh frekuensi eksitasi tersebut pada beban aktual yang dapat dilihat pada gambar 7.



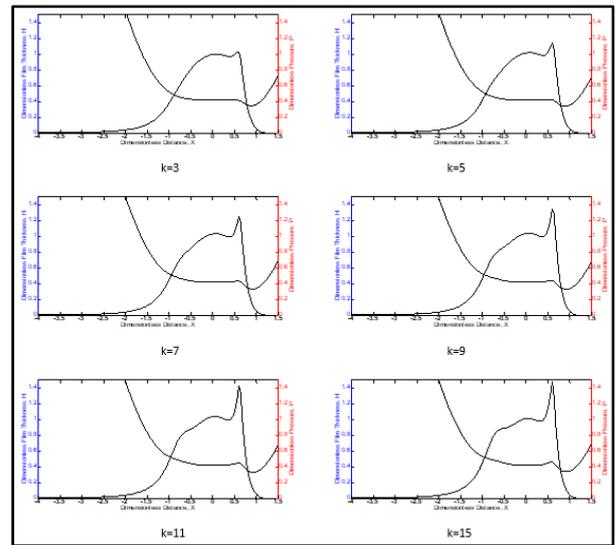
Gambar 7 Variasi Frekuensi terhadap beban aktual, sumbu x: waktu (*millisecond*) dan sumbu y: beban aktual (kN/m)

Tabel 5 Hasil simulasi dengan Amp=0,2 dan Freq= $\pi/2$

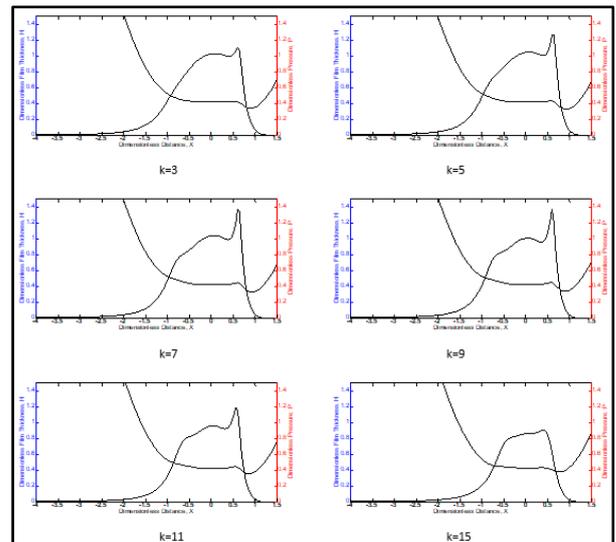
No.	A	Freq	k	Pmax	Hmin	Hcent
1			3	1,0281	0,3475	0,5269
2			5	1,1413	0,3385	0,5262
3	0,2	$\pi/2$	7	1,2495	0,3322	0,5258
4			9	1,3455	0,3287	0,5256
5			11	1,4227	0,3277	0,5255
6			15	1,4834	0,3277	0,5259

Tabel 6 Hasil simulasi dengan Amp=0,2 dan Freq= π

No.	A	Freq	k	Pmax	Hmin	Hcent
1			3	1,1040	0,3395	0,5259
2			5	1,2694	0,3285	0,5253
3	0,2	π	7	1,3687	0,3266	0,5256
4			9	1,3917	0,3266	0,5266
5			11	1,3917	0,3266	0,5281
6			15	1,3917	0,3266	0,5311

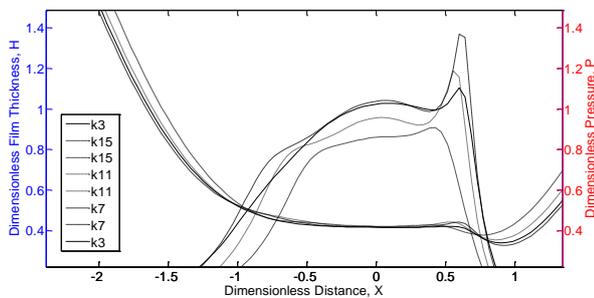


Gambar 8 *Dimensionless* tekanan dan ketebalan lapisan film untuk F=114 kN/m, *rolling speed*=5,8 m/s, Amp=0,2, Freq= $\pi/2$



Gambar 9 *Dimensionless* tekanan dan ketebalan lapisan film untuk F=114 kN/m, *rolling speed*=5,8 m/s, Amp=0,2, Freq= π

Jika dilihat secara garis besar gambar 8 sampai gambar 9 tidak begitu menunjukkan perubahan grafik yang begitu signifikan jika dibandingkan dengan variasi amplitudo. Namun tetap terjadi perubahan pada grafik yang diplot. Dengan memvariasikan frekuensi, akan menimbulkan suatu perubahan pada ketebalan lapisan film dan juga tekanan karena timbulnya getaran yang tidak menentu. Tentunya hal ini juga menandakan bahwa terdapat beberapa efek beban dinamis transien yang berlaku pada perilaku *Elastohydrodynamic Lubrication* (EHL).



Gambar 10 Sampel hasil dari pengaruh beban terhadap Amp=0,2 dan freq= π

Gambar 10 merupakan salah satu bentuk dari bagaimana beban, frekuensi, serta amplitudo mempengaruhi grafik. Terlihat tekanan mengalami peningkatan yang berbeda beda. Selain itu ketebalan lapisan film yang terjadi juga mengalami perubahan walaupun tidak terlalu besar perubahan yang didapatkan. Hal ini tentu tidak lepas karena adanya beban sinusoidal yang bervariasi ketika melakukan *running* pada program. Karena beban yang diterapkan adalah berupa sinusoidal, maka tentu akan dilakukan perubahan berulang secara berkala. Disisi lain, area transisi dari zona *inlet* ke *outlet* akan terjadi pengecilan area permukaan sehingga tekanan menjadi naik, hal tersebut dinamakan *pressure maximum spike*, hal ini dapat terjadi akibat hubungan eksponensial antara viskositas dan tekanan. Dengan begitu dapat diambil suatu kesimpulan bahwa perubahan tekanan dan ketebalan lapisan film mengalami perubahan besar dikarenakan adanya getaran yang terjadi ketika bearing beroperasi. Sehingga dampak yang akan diterima nantinya adalah performa dari bearing itu sendiri, yang mana bearing akan cepat mengalami kerusakan baik itu *pada inner ring*, *outer ring*, dan juga *roller element*.

5. Simpulan

Eksitasi getaran yang diberikan dari luar mempengaruhi beban aktual yang terjadi dimana bebannya berupa fungsi sinusoidal. Semakin tinggi nilai amplitudo eksitasi maka semakin besar beban maksimum dan beban minimum yang terjadi pada kontak. Sedangkan frekuensi eksitasi berpengaruh kepada seberapa banyak pengulangan yang terjadi selama rentang waktu tertentu. Perubahan beban aktual yang bekerja akibat adanya eksitasi dari luar mempengaruhi lapisan film yang terbentuk dan tekanan yang terjadi selama rentang waktu tertentu. Pada saat dimana beban mencapai maksimum, lapisan film yang terjadi menjadi lebih tipis dibandingkan pada waktu yang lain.

Daftar Pustaka

- [1] Liu, X., Li, S., Yang, P., & Yang, a. P. (2013). On the Lubricating Mechanism of Roller Skew. *Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, 933.
- [2] Hooke, C. J. (2003). Dynamic Effects in EHL contacts. *Elsevier B. V*, 69.
- [3] Bintoro, C., Bagiasna, K., Suharto, D., & Abidin, d. Z. (2004). Kaji Komputasional Pengaruh Beban dan Keausan Terhadap Kekakuan Bantalan Rol. *Jurnal Teknik Mesin*, 52.
- [4] NTN Corporation. (2009). *Ball and Roller Bearings*
- [5] Cupu, D. R., Sheriff, J. M., & Osman, K. (2012). Bio-Based Lubricants for Numerical Solution of Elastohydrodynamic Lubrication. *Jurnal Teknologi*, 40.
- [6] SKF, G. (2018). *Rolling Bearings*. United States: 10000 EN.
- [7] Venner, C., & Lubrecht, A. (2000). *Multilevel Methods In Lubrication*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science B.V.