

Kaji Numerik Pengaruh Beban Awal, Kecepatan Permukaan dan Radius Bearing terhadap Ketebalan Lapisan Film dan Tekanan *Elastohydrodynamic* pada *Cylindrical Roller Bearing* Menggunakan Metode Beda Hingga

Zeta Zulfikar¹, Dedi Rosa Putra Cupu², Nazaruddin³

Konstruksi dan Perancangan, Teknik Mesin, Universitas Riau

¹zeta.zulfikar3322@student.unri.ac.id, ²dedi.cupu@lecturer.unri.ac.id, ³nazaruddinyok@gmail.com

ABSTRACT

Contact between the roller element with the inner or outer ring produces enormous pressure which can cause friction between the surfaces of the two objects. The continuous friction will result in wear and using lubricant between the two contacting surfaces becomes an important role to reduce friction as well as wear. There are several types of lubrication, one of them is elastohydrodynamic lubrication. In this study the numerical method of Finite Difference Method is used to solve Reynolds equation in order to investigate the effect of basic parameters such as initial load, surface speed and radius of the cylindrical roller bearing. A single contact of cylinder roller and inner ring is modeled as a contact between a solid cylinder and flat plate. The influence of temperature, non-newtonian fluids and dynamic loads are ignored in this research. Central-difference scheme in the Finite Element Method is used to solve the Reynolds equation for calculating the elastohydrodynamic pressure that occurs on a contact. The results obtained show that there is an influence of the initial load, velocity and also the radius of the pressure generated at the time of contact between the solid cylindrical bearing element and the thickness of the film layer formed between the two surfaces of the object. The greater load given will increase the maximum pressure, but reduce the minimum film thickness. While when given variations in velocity, increasing the minimum value of film thickness and reduce the maximum pressure. Likewise what happens when variations in radius are given, increasing the minimum value of film thickness and reducing the value of maximum pressure.

Keywords: *Elastohydrodynamic Lubrication, Film Thickness, Elastohydrodynamic Pressure, Finite Element Method*

1. Pendahuluan

Bantalan gelinding atau yang dikenal dengan *rolling bearing* tersusun dari lintasan luar (*outer race*), lintasan dalam (*inner race*), elemen gelinding (*roller*) berada diantara inner ring dan outer ring, dan pemegang (*cage*). *Cage* berpusat pada elemen bergulir yang memungkinkan pelumas ke *bearing* dengan mudah. *Cage* berperan sebagai penopang ketika *bearing* mengalami kecepatan ringgi, tingkat getaran tinggi atau gaya inersia yang berasal dari pergerakan seluruh *bearing*. Kontak yang terjadi antara *roller element* dengan *inner* ataupun *outer ring* menghasilkan tekanan yang sangat besar yang bekerja pada kontak area yang sangat kecil sehingga dapat menimbulkan gesekan di antara permukaan kedua benda tersebut. Gesekan yang terjadi secara terus-menerus akan mengakibatkan keausan (*wear*). Pemberian *lubricant* (pelumas) menjadi peran yang penting untuk mengurangi gesekan dan juga keausan [1].

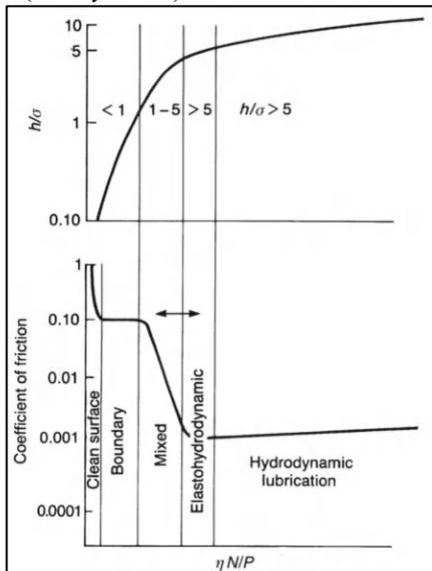
Tujuan *lubricant* (pelumas) adalah untuk memberikan lapisan film antara permukaan *sliding* dan *rolling*, membantu mendistribusikan dan menghilangkan panas, dan untuk mencegah korosi pada permukaan *bearing*. Terdapat

beberapa faktor yang mempengaruhi ketebalan lapisan film, diantaranya besarnya beban yang bekerja, kecepatan, temperatur, *lubricant* (viskositas dan densitas), beban statik atau beban dinamik, dan lain sebagainya.

Berdasarkan ketebalan lapisan film yang terbentuk, ada beberapa jenis proses *lubrication* yaitu *boundary lubrication*, *mixed lubrication*, *elastohydrodynamic lubrication* dan *hydrodynamic lubrication*. Gambar 1 menunjukkan kondisi dimana film pelumas dan koefisien gesek sebagai fungsi dari produk viskositas absolut (η) dan kecepatan rotasi dalam putaran per unit detik (N) dibagi dengan beban per unit area *bearing* yang diproyeksikan (P). Semakin tinggi *Hersey Number* ($\eta N/P$) atau yang biasa disebut *dimensionless hersey number* maka film pelumasnya relatif tebal, dan semakin kecil *Hersey Number* ($\eta N/P$) maka akan menghasilkan film pelumas yang tipis [2].

Perhitungan distribusi tekanan yang dihasilkan oleh kontak antara dua benda adalah penting untuk memprediksi tegangan yang terjadi akibat adanya beban yang bekerja pada saat *bearing* beroperasi. Perhitungan profil ketebalan lapisan film khususnya nilai minimum lapisan

film yang terbentuk memberikan informasi apakah cukup untuk mencegah terjadinya kontak langsung antara permukaan dua benda tersebut. Pada studi kasus ini, kontak yang akan diprediksi adalah antara inner ring dengan silinder pejal elemen *bearing*. Dengan melakukan pembatasan masalah, seperti studi kasus analisis dilakukan pada *cylindrical roller bearing* yaitu fluida *non-newtonian*, temperatur diasumsikan tetap (*isothermal*), beban yang bekerja diasumsikan konstan (*steady-state*).



Gambar 1. Stribeck Curve [3]

Pada penelitian ini, *cylindrical roller bearing* yang digunakan untuk simulasi bearing dengan tipe NU 310 ECP. Sifat fisik atau *physical parameter* yang akan digunakan untuk *input parameter* pada variasi *load* dan kecepatan dapat dilihat pada Tabel 1. Namun pada saat dilakukan variasi radius tipe *bearing* yang digunakan akan berbeda-beda seperti pada Tabel 2.

Tabel 1. *Physical Parameters Cylindrical Roller Bearing* tipe NU 310 ECP [4]

Material	Steel: AISI 52100
Elastic Modulus (E)	210 GPa
Poisson's ratio (ν)	0,3
Roller radius (R)	13,225 mm

Tabel 2. Variasi Radius *Cylindrical Roller Bearing* [4]

No	Tipe Bearing	D inner (mm)	D roller (mm)
1	NU 1010 ECP	57.5	6.5
2	NU 1011 ECP	64.5	7.25
3	NUP 2210 ECP	59.5	8.95
4	NU 310 ECP	65	13.225
5	NU 409	64.5	14.45
6	NU 410	70.8	15.4

Tabel 3 menampilkan spesifikasi dari lubricant fluida Newtonian yang digunakan berupa *Mineral Oil P150N* dengan viskositas dan densitas yang sudah ditentukan seperti yang dijelaskan pada batasan masalah.

Tabel 3. Spesifikasi *Lubricant Mineral Oil P150N* [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

2. Persamaan

Persamaan yang digunakan pada penelitian ini dibuat dalam bentuk *dimensionless*. Persamaan *dimensionless* Reynolds dapat dituliskan sebagai berikut [6] :

$$\frac{d}{dX} \left(\epsilon \frac{dP}{dX} \right) - \frac{d(\rho^* H)}{dX} = 0 \quad (1)$$

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

$$\eta = \exp\{[\ln(\eta_0) + 9,67][-1 + (1 + 5,1 \times 10^{-9} P \cdot p_H)^Z]\} \quad (4)$$

Dimana,

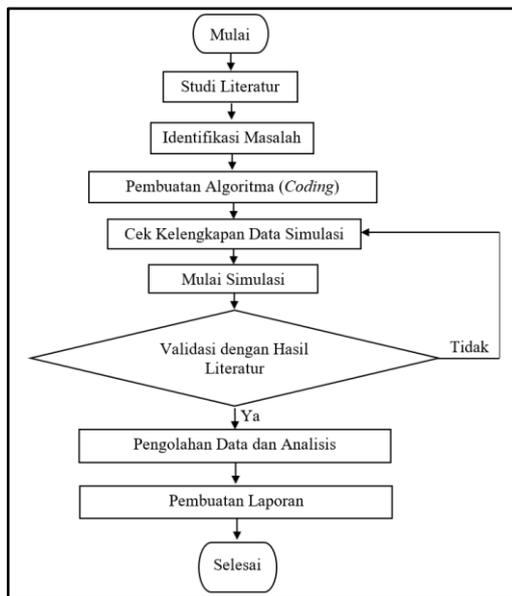
$$Z = \frac{\alpha}{(\ln(\eta_0) + 9,67)(5,1 \times 10^{-9})} \quad (5)$$

Persamaan *dimensionless force balance* dapat dituliskan sebagai berikut:

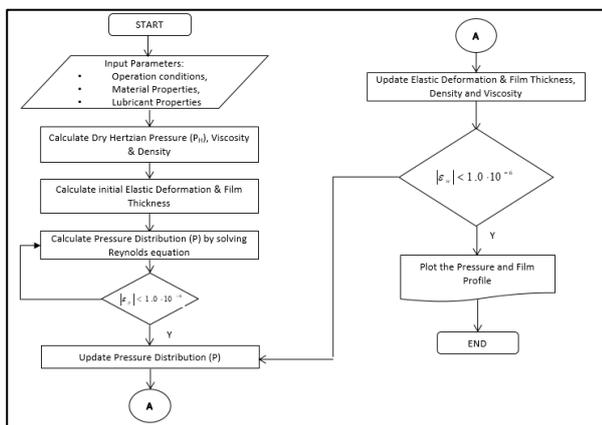
$$\int_{X_0}^{X_e} P dX = \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

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

Dalam penelitian ini, terdapat input parameter dalam program. Penulis mengkaji pengaruh input parameter yang meliputi *load* atau pembebanan, kecepatan, radius dan juga *meshing grid*. Perbandingan akan dilakukan dengan variasi pembebanan pada saat kecepatan dan radius tetap, lalu variasi kecepatan saat pembebanan dan radius tetap, dan terakhir variasi radius dengan pembebanan dan kecepatan tetap. Untuk pengaruh *meshing grid*, dilakukan variasi *meshing grid* dengan pembebanan, kecepatan dan radius yang sama.

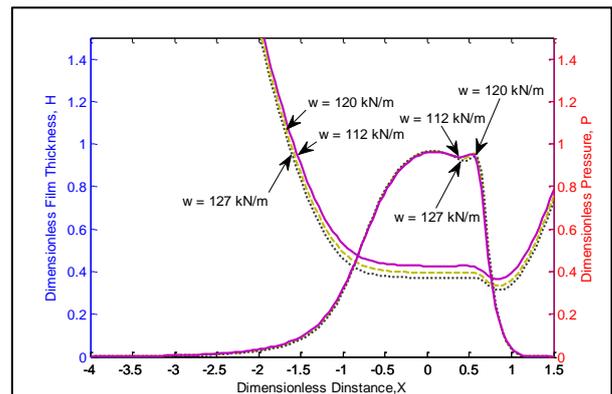
Simulasi pertama dilakukan pada program dengan memvariasikan *load* berdasarkan SKF *Catalogue* sebagai input parameter. Pada Tabel 4 nilai tekanan maksimum dan minimum ketebalan lapisan film yang terbentuk didapatkan melalui perhitungan pada program. Variasi *load* yang penulis tetapkan merupakan batas maksimal yang

dapat ditahan oleh *roller bearing* yang digunakan pada penelitian ini. Pada parameter kecepatan (u) ditetapkan sebesar 5,8 m/s dan radius ekivalen (R_{eki}) sebesar 0,0055 m.

Tabel 4. Hasil Simulasi Pengaruh *Load*

No.	W (kN/m)	u (m/s)	R _{eki} (m)	P _{max}	H _{min}
1	112	5,8	0,0055	0,9621	0,3650
2	114	5,8	0,0055	0,9635	0,3562
3	117	5,8	0,0055	0,9651	0,3440
4	120	5,8	0,0055	0,9658	0,3339
5	125	5,8	0,0055	0,9668	0,3191
6	127	5,8	0,0055	0,9672	0,3136

Pada Tabel 4 terlihat hasil pengaruh *load* setelah dilakukan 6 variasi pembebanan yaitu 112 kN/m, 114 kN/m, 117 kN/m, 120 kN/m, 125 kN/m, 127 kN/m, tetapi tidak terlihat perbedaan yang signifikan terhadap grafik yang didapatkan. Untuk memudahkan dalam membaca grafik. Dimana penulis mengambil 3 grafik hasil simulasi, yaitu pada saat pembebanan 112 kN/m, 120 kN/m, dan 127 kN/m. Terlihat pada grafik dan juga hasil simulasi pada Tabel 4 bahwa setiap nilai pembebanan mempengaruhi nilai minimum ketebalan lapisan film. Pada saat diberikan pembebanan dengan nilai yang besar akan menghasilkan nilai minimum ketebalan lapisan film yang lebih kecil atau tipis. Hal ini disebabkan karena pada saat diberikan pembebanan atau *load* akan berdampak ke tekanan, semakin besar *load* maka akan semakin besar pula nilai tekanan yang dihasilkan.



Gambar 4. Pengaruh *Load* terhadap Distribusi Tekanan dan Ketebalan Lapisan Film

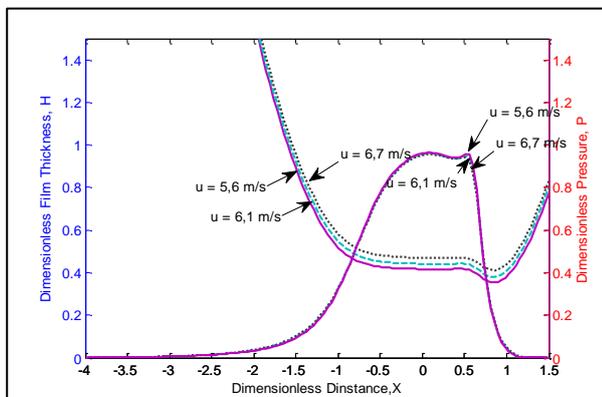
Pada Gambar 4 terlihat bahwa tekanan *elastohydrodynamic* mengalami titik puncak pada koordinat $X=0$ hingga $X=0,1$ dan mengalami peningkatan tekanan kedua pada koordinat $X=0,5$ hingga $X=0,7$. Lonjakan tekanan ini disebut sebagai *pressure spike* yang akan mengalami penurunan pada zona outlet. *Pressure spike* dapat terjadi akibat hubungan eksponensial antara viskositas dan tekanan. Dari Gambar 4 juga terlihat pengaruh pembebanan terhadap tekanan

elastohidrodinamik, dimana seiring dengan besarnya nilai pembebanan yang diberikan maka akan semakin besar pula nilai Pmax atau tekanan maksimum yang didapatkan.

Simulasi kedua dilakukan pada program dengan memvariasikan kecepatan berdasarkan SKF *Catalogue* sebagai input parameter. Pada Tabel 5 nilai tekanan dan minimum ketebalan lapisan film didapatkan melalui perhitungan pada program. Variasi *kecepatan* yang penulis tetapkan merupakan batas maksimal yang dapat ditahan oleh *roller bearing* yang digunakan pada penelitian ini. Pada parameter *load* (w) ditetapkan sebesar 112 kN/m dan radius ekivalen (R_eki) sebesar 0,0055 m.

Tabel 5. Hasil Simulasi Pengaruh Kecepatan

No.	w (kN/m)	u (m/s)	R_eki (m)	Pmax	Hmin
1	112	5,6	0,0055	0,9637	0,3541
2	112	5,8	0,0055	0,9621	0,3650
3	112	6,1	0,0055	0,9601	0,3808
4	112	6,3	0,0055	0,9584	0,3917
5	112	6,5	0,0055	0,9570	0,4020
6	112	6,7	0,0055	0,9559	0,4117



Gambar 5. Pengaruh Kecepatan terhadap Distribusi Tekanan dan Ketebalan Lapisan Film

Dari Gambar 5 terlihat grafik yang dihasilkan oleh simulasi berupa grafik distribusi tekanan dan ketebalan lapisan film yang telah diberikan 6 variasi kecepatan seperti yang terlihat pada Tabel 5. Penulis mengambil 3 grafik dari 6 variasi kecepatan yang dilakukan, yaitu nilai minimum kecepatan 5,6 m/s, maksimum kecepatan 6,7 m/s dan 6,1 m/s sebagai median dari variasi kecepatan, agar lebih memudahkan untuk melihat perbedaan antara grafik.

Pada Gambar 5 memperlihatkan pengaruh kecepatan terhadap ketebalan lapisan film. Pada saat diberikan nilai kecepatan yang rendah, maka akan menghasilkan nilai Hmin atau minimum ketebalan lapisan film yang kecil. Begitu pula sebaliknya jika semakin tinggi nilai kecepatan

nya, maka akan menghasilkan nilai Hmin yang besar.

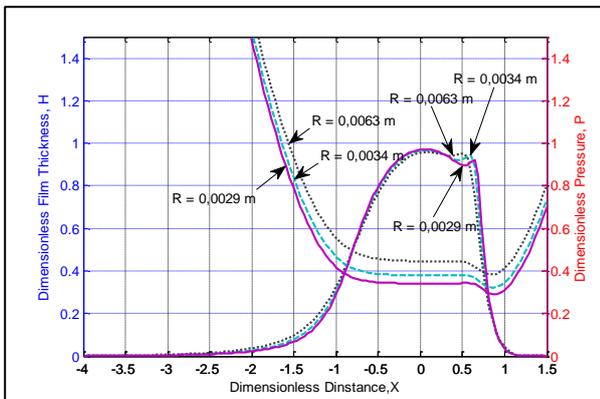
Namun hal yang berbeda terjadi pada saat diberikan variasi kecepatan terhadap tekanan elastohidrodinamik, terlihat bahwa tekanan *elastohydrodynamic* mengalami titik puncak tekanan pertama yaitu diantara X=0 hingga X=0,1 dan mengalami peningkatan tekanan kedua pada koordinat X=0,5 hingga X=0,6 yang disebut dengan lonjakan tekanan atau *pressure spike*. Jika dengan seiring meningkatnya *load* yang diberikan pada saat kecepatan konstan akan turut meningkatkan tekanan elastohidrodinamik, maka pada pengaruh kecepatan pada saat *load* ditetapkan sebesar 112 kN/m terhadap tekanan elastohidrodinamik didapatkan nilai tekanan Pmax semakin menurun seiring meningkatnya variasi kecepatan yang diberikan.

Jika sebelumnya dilakukan variasi *load* dan juga kecepatan, dilanjutkan simulasi yang dilakukan pada program dengan memvariasikan radius berdasarkan SKF *Catalogue* sebagai input parameter. Tabel 6 menunjukkan hasil simulasi dari pengaruh radius. Pada parameter *load* (w) ditetapkan sebesar 112 kN/m dan kecepatan (u) sebesar 5,8 m/s. R_eki merupakan roller reduce yang didapatkan dari perhitungan jari-jari inner ring dan juga jari-jari elemen roller. Maka dalam pengujian ini penulis memvariasikan jari-jari inner ring dan juga elemen roller berdasarkan SKF *Catalogue* untuk mendapatkan R_eki yang berbeda.

Tabel 6. Hasil Simulasi Pengaruh Radius

No.	w (kN/m)	u (m/s)	R_eki (m)	Pmax	Hmin
1	112	5,8	0,0029	0,9722	0,2906
2	112	5,8	0,0033	0,9703	0,3034
3	112	5,8	0,0039	0,9682	0,3212
4	112	5,8	0,0055	0,9621	0,3650
5	112	5,8	0,0059	0,9616	0,3681
6	112	5,8	0,0063	0,9590	0,3832

Pada Gambar 6 menunjukkan grafik pengaruh radius terhadap distribusi tekanan dan ketebalan lapisan film. Penulis melakukan 6 variasi radius, dimana radius ekivalen ini didapatkan dari perhitungan antara nilai radius *roller* dan radius *inner ring*. Untuk memudahkan dalam membaca grafik, hanya dicantumkan 3 grafik dengan nilai minimum radius 0,0029 m, median radius 0,0034 dan maksimum radius sebesar 0,0063 m.



Gambar 6. Pengaruh Radius terhadap Distribusi Tekanan dan Ketebalan Lapisan Film

Pada Gambar 6 terlihat bahwa pada saat diberikan variasi radius 0,0029 m, nilai minimum ketebalan lapisan yang terbentuk memiliki nilai yang paling rendah. Dari grafik pun terlihat bahwa terdapat pengaruh yang signifikan jika dilakukan perubahan radius, dimana semakin besar nilai radius yang diberikan maka semakin besar pula nilai minimum ketebalan lapisan film yang dihasilkan. Pada setiap radius memiliki kemampuan menahan pembebanan dan juga kecepatan yang berbeda, ukuran radius yang semakin kecil dengan pembebanan yang besar akan menghasilkan nilai minimum ketebalan lapisan film yang semakin rendah.

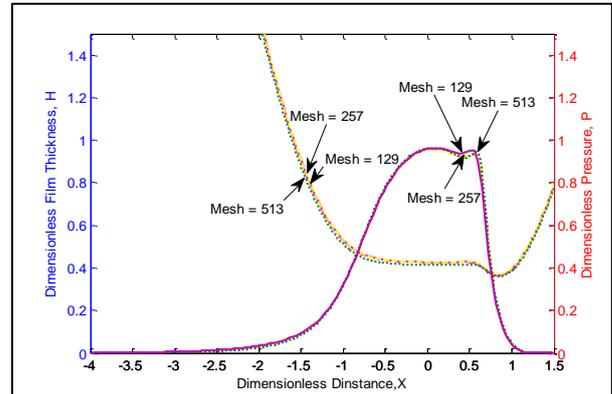
Selanjutnya, pada gambar terlihat bahwa tekanan *elastohydrodynamic* mengalami titik puncak pada koordinat $X=0$ hingga $X=0,1$ dan mengalami peningkatan tekanan kedua pada koordinat $X=0,5$ hingga $X=0,65$ yang disebut dengan *pressure spike*. Dimana terdapat penurunan nilai Pmax atau tekanan maksimum pada saat diberikan nilai radius yang besar. Semakin kecil radius yang diberikan maka akan semakin besar nilai Pmax yang dihasilkan.

Jika sebelumnya dilakukan variasi pada *load*, kecepatan dan juga radius. Maka untuk mengetahui pengaruh input parameter, penulis melakukan pengujian pengaruh input meshing grid pada simulasi. Pada pengujian ini ditetapkan *load* (w) sebesar 112 kN/m, kecepatan sebesar 5,8 m/s dan R_{eki} sebesar 0,0055 m.

Dari simulasi, terlihat pada Tabel 7 yang mana terdapat perbedaan yang sangat signifikan, yaitu *elapsed time* atau waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan simulasi. Dengan hasil iterasi yang menunjukkan error yang sama yaitu 0.0001, pada saat menggunakan nilai mesh yang kecil, waktu yang dibutuhkan lebih singkat dibandingkan dengan nilai mesh yang lebih besar.

Tabel 7. Hasil Simulasi Pengaruh *Meshing Grid*

No.	Meshing Grid	Pmax	Hmin	Elapsed Time (s)
1	129	0,9621	0,3650	64.645038
2	257	0,9580	0,3707	71.613992
3	513	0,9632	0,3601	93.226220



Gambar 7. Pengaruh *Meshing Grid* terhadap Distribusi Tekanan dan Ketebalan Lapisan Film

Pada Gambar 7 terlihat bahwa pada titik puncak $X=0$ hingga $X=0,2$ hampir tidak terlihat perbedaan hasil nilai tekanan dan susah untuk membedakan warna grafik karena grafik saling menghimpit, namun pada titik puncak $X=0,5$ dan $X=0,7$ terlihat mulai adanya perbedaan nilai tekanan dan perbedaan warna terlihat karena nilai Pmax yang berbeda antara grafik satu dan lainnya. Sedangkan pada Gambar 7 terlihat kesamaan bentuk grafik dan juga nilai H, yang membuat sulitnya membaca grafik. Hampir tidak terlihat sama sekali perbedaan pada saat nilai mesh 129 dan 257.

5. Simpulan

Algoritma untuk menghitung distribusi tekanan dan ketebalan lapisan film yang dibuat pada penelitian ini telah dilakukan validasi terhadap hasil eksperimen yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Dengan mempertimbangkan beberapa asumsi dapat disimpulkan bahwa algoritma ini layak digunakan untuk melihat pengaruh parameter dasar terhadap ketebalan lapisan film dan tekanan yang terjadi pada kontak.

Parameter operasional dasar seperti *load*, kecepatan dan juga radius berpengaruh terhadap tekanan yang terjadi dan ketebalan lapisan film yang terbentuk di antara kedua permukaan benda. Dengan 6 variasi *load* didapatkan bahwa saat *load* pada bearing tipe NU 310 ECP akan semakin meningkatkan tekanan maksimum yang dihasilkan, tetapi mengurangi minimum ketebalan lapisan film. Sedangkan pada variasi kecepatan meningkatkan nilai minimum ketebalan lapisan film dan mengurangi tekanan maksimum. Begitu

pula yang terjadi pada saat diberikan variasi radius dengan tipe bearing yang berbeda-beda dengan *load* 112 kN/m dan kecepatan 5,8 m/s akan meningkatkan nilai minimum ketebalan lapisan film dan mengurangi nilai tekanan maksimum

Daftar Pustaka

- [1] C. Bintoro, K. Bagiasna, D. Suharto and d. Z. Abidin, "Kaji Komputasional Pengaruh Beban dan Keausan Terhadap Kekakuan Bantalan Rol," *Jurnal Teknik Mesin*, p. 52, 2004.
- [2] B. J. Hamrock, S. R. Schmid and B. O. Jacobson, *Fundamentals of Fluid Film Lubrication Second Edition*, New York: Marcel Dekker Inc., 2004.
- [3] B. Bhusan, *Introduction To Tribology Second Edition*, New Delhi, India: Aptara Inc., 2013.
- [4] SKF Group, *Rolling Bearing*, United State, 2018.
- [5] S. Mia and N. Ohno, *Prospect of Mustard Oil and Coconut Oil as Environment Friendly Lubricant for Bangladesh*. Proceedings of International Conference on Environmental Aspects of Bangladesh, Japan, 2010.
- [6] P. Huang, *Numerical Calculation of Lubrication: Methods and Program*, China: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2013.