

Kaji Numerik Pengaruh *Bio-Based Lubricant* Terhadap Ketebalan Lapisan *Film* dan Tekanan *Elastohydrodynamic* pada *Cylindrical Roller Bearing* Menggunakan Metode Beda Hingga

Adibyathul Fikri Januar¹, Dedi Rosa Putra Cupu², Nazaruddin³

Konstruksi dan Perancangan, Teknik Mesin, Universitas Riau

¹adibyathul.fikri1212@student.unri.ac.id, ²dedi.cupu@lecturer.unri.ac.id, ³nazaruddinyok@gmail.com

ABSTRACT

In this research, numerical study are used to examine the effect of bio-based lubricants, i.e. coconut oil, olive oil, and palm oil as lubricants in the application of roller element bearings, or called elastohydrodynamic lubrication (EHL), especially in contact with the inner ring with cylindrical roller elements. This simulation applies the finite difference method to solve the Reynolds equation and the pressure-viscosity equation to analyze the EHL pressure and the thickness of the film layer formed. The results show that olive oil is the right choice in replacing mineral oil in the application of roller bearings. By providing variations in load and speed, olive oil shows the results of low pressure spikes or no pressure spikes during the simulation process. However, in general coconut oil and palm oil can replace mineral oil as a function of lubrication. As a comparison purpose, mineral oil (P150N) is used to see the difference that occurs in the EHL pressure and the thickness of the film layer formed.

Keywords: elastohydrodynamic lubrication, film thickness, bio-based lubricant

1. Pendahuluan

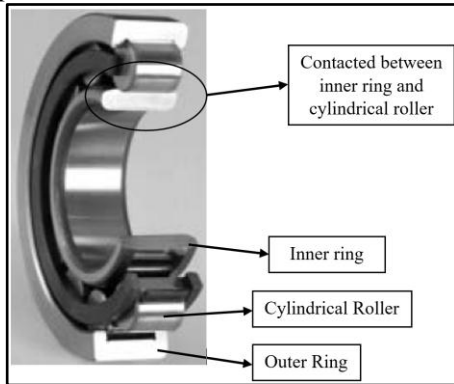
Meningkatnya penggunaan pelumas berbahan dasar minyak mineral menyebabkan naiknya permintaan dunia yang dibuktikan dengan adanya laporan Freedonia pada tahun 2007 sebanyak 41,8 juta ton atau sekitar 13 miliar gallons, dimana wilayah Asia/Pasifik mengalami peningkatan yang signifikan. Pasar internasional membaginya dalam beberapa kategori penggunaan, yakni sekitar 48% pada oli mesin, 15,3% pada oli proses, 10,2% pada oli hidrolik, dan 26,5% penggunaan lainnya. Mempertimbangkan akan adanya peningkatan krisis energi dunia dan permasalahan lingkungan, membuat beberapa negara, hukum dan peraturan diberlakukan untuk mengatur produksi, penerapan, dan pembuangan limbah pelumas. Peraturan ini dibuat untuk meminimalisir bahaya kesehatan dan juga efek buruk bagi lingkungan [1].

Bio-based oils ialah salah satu inovasi yang memanfaatkan *flora* (tumbuhan) dan *fauna* (hewan) dalam menghasilkan pelumas. *Bio-based oils* ini tentunya ramah lingkungan dan merupakan sumber energi yang dapat diperbarui. *Bio-based* tersebut yang akan berperan sebagai pelumas pada peralatan, perlengkapan dan kebutuhan lainnya. Umumnya *bio-based oils* menggunakan bahan dari tumbuhan, baik itu berupa tumbuhan sayuran, buah, benih, ataupun tanaman lain [2]. Pada beberapa penerapan *bio-based oils*, tentunya diperlukan penambahan bahan aditif lainnya yang berfungsi untuk

menutupi kekurangan dari *bio-based oils* tersebut tergantung kebutuhan dan kondisi operasional. Beberapa contoh dari *bio-based oils* yang berhasil diteliti diantaranya *coconut oil*, *sunflower oil*, *soybean oil*, dan *castor oil* [2][3].

Akhir-akhir ini, penggunaan *bio-based lubricants* meningkat seiring berkembangnya hasil penelitian terkait *bio-based lubricants*. Terdapat beberapa peneliti yang menggunakan *bio-based lubricants* sebagai fungsi pelumasan pengganti *mineral oil*, seperti [4] menggunakan *bio-based lubricants* untuk meneliti sifat dan respon *bio-based lubricants properties* terhadap *high pressure tribological* yang menunjukkan hasil bahwa *bio-based lubricants* mempunyai *viscosity index* (VI) yang tinggi dan viskositas yang bagus dibandingkan dengan *mineral oil* pada tekanan atmosfer dan pada tekanan tinggi, dan [5] melakukan penelitian eksperimental menggunakan *bio-based lubricants* sebagai *lubricant* pada kontak EHL (*elastohydrodynamic lubrication*) dengan hasil saat kondisi *full lubrication*, *traction coefficients bio-based lubricants* lebih rendah daripada *mineral oil* dengan nilai kelas viskositas yang sama. Pada penelitian ini, *bio-based lubricants* yang telah diuji oleh [1], [4], dan [5] seperti pada Tabel 1 akan digunakan sebagai *lubricants* pada simulasi *elastohydrodynamic lubrication*, yang mana kontak yang terjadi menghasilkan tekanan yang sangat besar mencapai 3 GPa yang bekerja pada kontak area yang sangat kecil (berkisar 0,1 sampai 1 mm) [6][7]. Pada simulasi ini, *cylindrical roller*

bearing akan digunakan sebagai objek kajian seperti pada Gambar 1 dan spesifikasi bearing pada Tabel 2. Dengan melakukan pembatasan masalah, seperti studi kasus analisis dilakukan pada *cylindrical roller bearing*, temperatur diasumsikan tetap (*isothermal*), beban yang bekerja diasumsikan konstan (*steady-state*), dan struktur kimiawi pada *lubricant* tidak dibahas pada penelitian ini.



Gambar 1 *Cylindrical roller bearing* [8]

Penelitian ini menggunakan *bio-based oil* sebagai *lubricant* pada saat simulasi. Sifat (*properties*) dari *bio-based lubricants* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 *Lubricants properties* [1][4][5]

<i>Lubricants</i>	ρ ,	ν ,	VI	α , GPa ⁻¹
	g/mL	mm ² /s		
	15°C	40°C		40°C
<i>Coconut oil</i>	0,9260	27,6	165	13,09
<i>Olive oil</i>	0,9137	39,6	190	8,10
<i>Palm oil</i>	0,8930	40.24	NA	17.13

Penelitian ini menggunakan *cylindrical roller bearing* untuk simulasi dengan tipe NU 310 ECP. Sifat fisik atau *physical parameter* dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 *Physical parameter cylindrical roller bearing NU 310 ECP* [8]

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 [9]:

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

Persamaan *dimensionless* ketebalan lapisan *film* dapat dituliskan sebagai berikut [9]:

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

Persamaan *dimensionless* densitas (ρ) dituliskan sebagai berikut [9]:

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

Untuk kalkulasi viskositas (η), persamaan *viscosity-pressure* yang digagas oleh Roelands akan digunakan pada simulasi ini [9]:

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

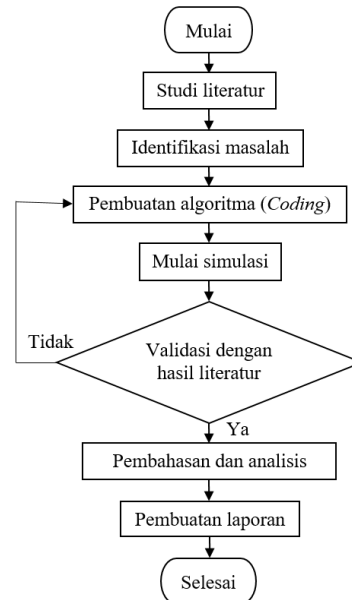
$$\text{Dimana, } Z = \frac{\alpha}{(\ln(\eta_0) + 9,67)(5,1 \times 10^{-9})} \quad (5)$$

Persamaan *dimensionless force balance* dapat dituliskan sebagai berikut [9]:

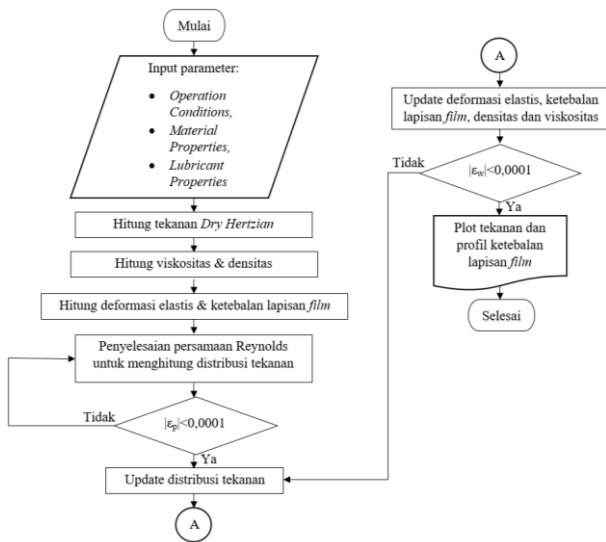
$$\int_{X_0}^{X_e} P dX = \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

3. Metodologi

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode kaji 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

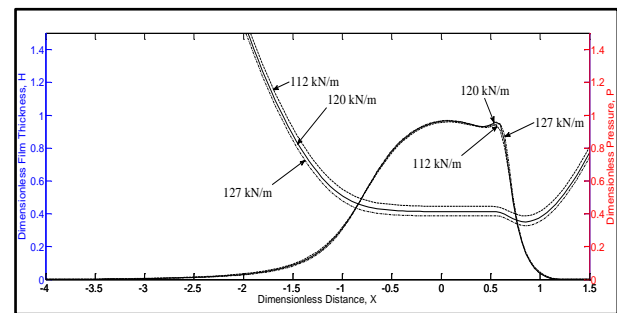
4. Hasil dan Pembahasan

Simulasi dengan *input parameter* akan divariasikan, dibagi atas dua kategori yakni berdasarkan pengaruh *load* terhadap *pressure* dan *film thickness* dan pengaruh *speed* terhadap *pressure* dan *film thickness*. Data hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5. Pada pengaruh *load*, parameter kecepatan (*u*) dan jari-jari *roller* ekivalen (R_{ek}) tidak divariasikan, melainkan ditetapkan sebesar 5,8 m/s dan 0,0055 m. Sedangkan pada pengaruh *speed*, parameter *load* dan jari-jari *roller* ekivalen (R_{ek}) tidak divariasikan, melainkan ditetapkan sebesar 114 kN/m dan 0,0055 m. Untuk perhitungan ketebalan lapisan *film*, nilai H_0 (ketebalan lapisan *film* awal) ditetapkan sebesar 0,3. Pada setiap grafik hanya akan ditampilkan tiga variabel, yakni nilai variabel minimum, variabel tengah, dan nilai variabel maksimum baik itu pada pengaruh *load* maupun pengaruh *speed*. Sebagai tujuan perbandingan, *mineral oil* (P150N) akan digunakan sebagai pembandingan terhadap hasil numerikal *bio-based lubricants*. Perbandingan akan dilakukan dengan rincian, *coconut oil* terhadap *mineral oil*, *olive oil* terhadap *mineral oil*, dan *palm oil* terhadap *mineral oil*.

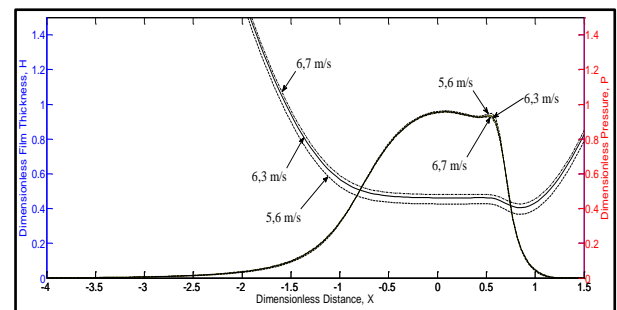
Pada Gambar 4 menunjukkan grafik distribusi tekanan dan ketebalan lapisan *film* menggunakan *coconut oil*. Terlihat bahwa tekanan *elastohydrodynamic* terus meningkat pada zona *inlet* dan mengalami titik puncak pada koordinat $X=0$ dan mengalami peningkatan tekanan kedua pada koordinat $X=0,5$ hingga $X=0,7$. Dengan nilai awalan $H_0=0,3$, ketebalan lapisan *film* setiap variasi beban mengalami perubahan. Semakin tinggi *load* yang diberikan maka ketebalan lapisan *film* juga semakin menipis atau berkurang.

Tabel 3 Hasil simulasi numerikal *coconut oil*

No.	w (kN/m)	u (m/s)	R_{ek} (m)	Pmax	Hmin	Keterangan
1	112			0,9597	0,3870	Pengaruh
2	114			0,9613	0,3774	Load
3	117	5,8	0,0055	0,9632	0,3643	terhadap
4	120			0,9655	0,3510	Pressure
5	125			0,9673	0,3332	dan Film
6	127			0,9676	0,3275	Thickness
7		5,6		0,9626	0,3668	Pengaruh
8		6,1		0,9589	0,3942	Speed
9	114	6,3	0,0055	0,9574	0,4050	terhadap
10		6,5		0,9560	0,4156	Pressure
11		6,7		0,9546	0,4263	dan Film
						Thickness



Gambar 4 Pengaruh variasi *load coconut oil*



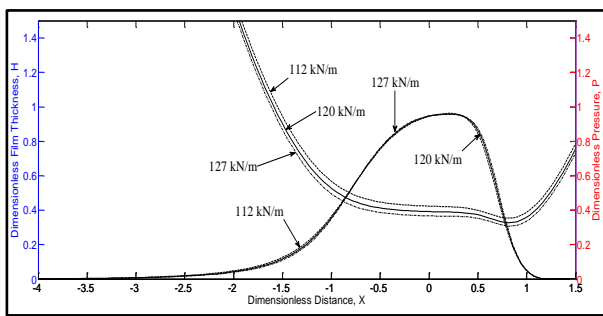
Gambar 5 Pengaruh variasi *speed coconut oil*

Pada pengaruh *speed* seperti pada Gambar 5, nilai tekanan P_{max} semakin menurun seiring meningkatnya variasi kecepatan yang diberikan. H_{min} (ketebalan lapisan *film* minimum) terlihat semakin meningkat (tebal). Ini dapat menjadi pengaruh bahwa kecepatan secara tidak langsung turut mempengaruhi tekanan, dan tekanan akan mempengaruhi nilai viskositas dan densitas. Gambar 6 dan Gambar 7 merupakan grafik tekanan *olive oil*. Merujuk kepada Tabel 4, nilai P_{max} semakin menurun seiring meningkatnya *load* yang diberikan. Jika kita lihat dari segi *lubricant properties*, kedua *lubricant* tersebut yakni *coconut oil* dan *olive oil* memiliki nilai *pressure-viscosity coefficient* sebesar $13,09 \times 10^{-9} \text{ GPa}^{-1}$ dan $8,10 \times 10^{-9} \text{ GPa}^{-1}$, secara berurutan. Fenomena *pressure spike* tidak muncul pada *olive oil*. Ini dapat disebabkan oleh nilai *pressure-viscosity coefficient* *olive oil* yang tergolong paling rendah dari dua *bio-based lubricants* lainnya. Nilai ketebalan lapisan *film*

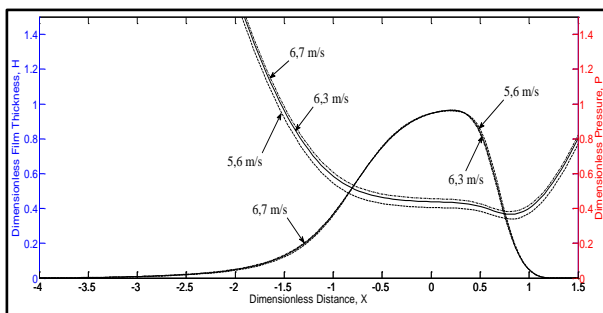
minimum (Hmin) mengalami penurunan seiring meningkatnya pembebanan.

Tabel 4 Hasil simulasi numerikal *olive oil*

No.	w (kN/m)	u (m/s)	R _{ek} (m)	Pmax	Hmin	Keterangan
1	112			0,9623	0,3541	Pengaruh
2	114			0,9615	0,3472	Load
3	117	5,8	0,0055	0,9603	0,3373	terhadap
4	120			0,9591	0,3279	Pressure
5	125			0,9572	0,3135	dan Film
6	127			0,9567	0,3080	Thickness
7		5,6		0,9605	0,3392	Pengaruh
8		6,1		0,9629	0,3589	Speed
9		6,3	0,0055	0,9638	0,3667	terhadap
10	114	6,5		0,9647	0,3744	Pressure
11		6,7		0,9655	0,3820	dan Film Thickness



Gambar 6 Pengaruh variasi load *olive oil*



Gambar 7 Pengaruh variasi speed *olive oil*

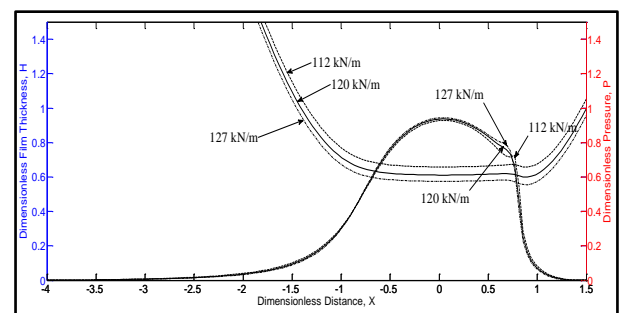
Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh [1] bahwa nilai *pressure-viscosity coefficient* turut mempengaruhi *pressure spike* pada grafik tekanan *elastohydrodynamic*. Pada pengaruh speed, nilai Pmax dan Hmin mengalami peningkatan seiring peningkatan variasi speed yang diberikan. Puncak Pmax yang terjadi tidak tepat berada pada titik koordinat X=0 melainkan berada di antara koordinat X=0,2 dan X=0,4. Hal ini disebabkan keberadaan *pressure spike* yang tidak muncul, sehingga menyebabkan posisi titik puncak bergeser dari titik tengah posisi *bearing* yakni X=0. Ketebalan lapisan film memiliki bentuk *dimple* yang signifikan pada zona *outlet*. Bagian *center* lapisan film sedikit mengalami bentuk datar dan cenderung langsung membentuk *dimple*. Dari perkiraan H0 yang penulis tetapkan, terdapat selisih yang tidak begitu besar.

Tabel 5 Hasil simulasi numerikal *palm oil*

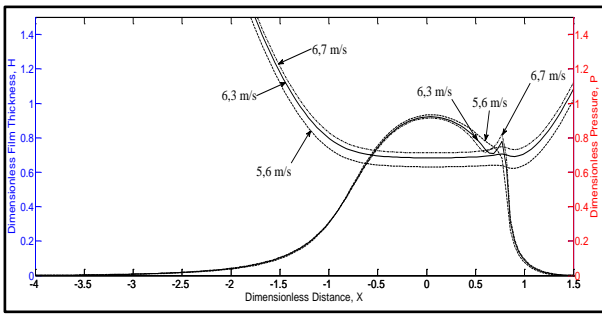
No.	w (kN/m)	u (m/s)	R _{ek} (m)	Pmax	Hmin	Keterangan
1	112			0,9280	0,6573	Pengaruh
2	114			0,9308	0,6416	Load
3	117	5,8	0,0055	0,9349	0,6191	terhadap
4	120			0,9377	0,5986	Pressure
5	125			0,9426	0,5670	dan Film
6	127			0,9439	0,5551	Thickness
7		5,6		0,9335	0,6222	Pengaruh
8		6,1		0,9261	0,6682	Speed
9		6,3	0,0055	0,9222	0,6830	terhadap
10	114	6,5		0,9185	0,6977	Pressure
11		6,7		0,9143	0,7121	dan Film Thickness

Gambar 8 memperlihatkan bahwa *palm oil* memiliki *pressure spike* yang mendekati zona *outlet*. Nilai *pressure-viscosity coefficient* daripada *palm oil* merupakan yang tertinggi dari kedua *lubricants* lainnya yakni sebesar $17,13 \times 10^{-9} \text{ GPa}^{-1}$. Jika diurutkan dari yang terkecil hingga terbesar, ialah *olive oil*, *coconut oil* dan *palm oil*. Variasi peningkatan load yang diberikan akan mempengaruhi kepada nilai Pmax yang semakin meningkat dan ketebalan lapisan minimum (Hmin) mengalami penurunan atau berkurang. Namun jika dibandingkan dengan *coconut oil*, nilai ketebalan lapisan minimum pada *palm oil* cenderung lebih tebal yakni berkisar di rentang angka 0,5 hingga 0,6.

Pada Gambar 9, *pressure spike* yang terjadi cukup signifikan. Terbentuk mendekati zona *outlet*, pada *palm oil* pengaruh speed membuktikan bahwa variasi speed turut mempengaruhi *pressure spike*. Merujuk kepada Tabel 5, akibat dari pengaruh speed nilai Pmax yang terjadi mengalami penurunan atau terus berkurang seiring meningkatnya variasi speed yang diberikan. Pada Hmin, mengalami peningkatan atau semakin menebal seiring meningkatnya variasi speed yang diberikan. Namun tetap saja tidak berbeda jauh terhadap pengaruh load, nilai Hmin dengan pengaruh speed cukup tebal yakni berkisar di rentang angka 0,6 hingga 0,7.



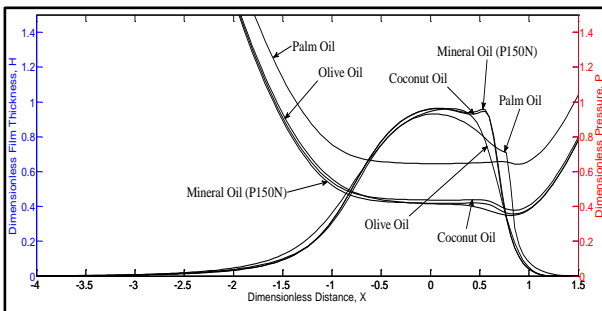
Gambar 8 Pengaruh variasi load *palm oil*



Gambar 9 Pengaruh variasi *speed palm oil*

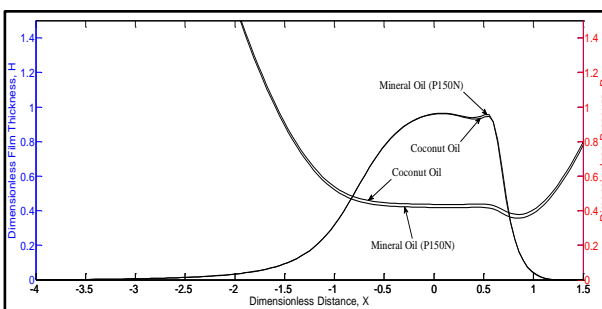
Tabel 6 Perbandingan *bio-based lubricants* terhadap *mineral oil*

No.	Lubricants	w (kN/m)	u (m/s)	R_{ek} (m)	Pmax	Hmin
1	Coconut Oil	114	5,8	0,0055	0,9613	0,3774
2	Olive Oil				0,9615	0,3472
3	Palm Oil				0,9308	0,6416
4	Mineral Oil				0,9633	0,3565

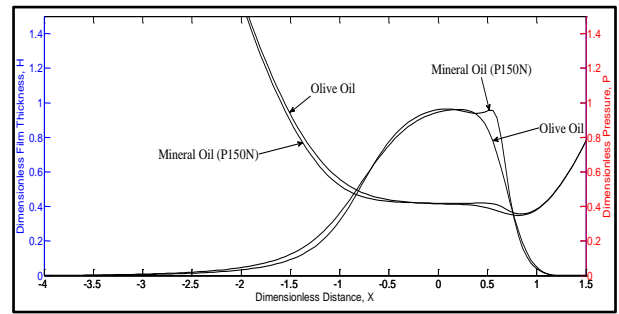


Gambar 10 *Overlapping bio-based lubricants* terhadap *mineral oil*

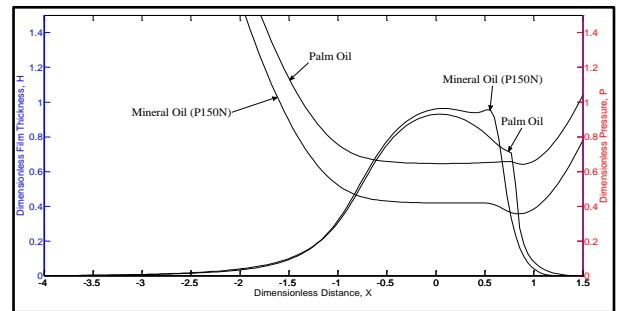
Pada Tabel 6 menampilkan hasil simulasi numerikal yang telah dilakukan terhadap empat lubricants tersebut. Dari segi data berupa angka, nilai Pmax yang dihasilkan tidak memiliki perbedaan yang berbeda jauh dengan nilai Pmax terendah ialah pada *palm oil* sebesar 0,9308. Pmax dengan nilai tertinggi ialah pada *mineral oil* sebesar 0,9633. Melihat nilai Hmin dari hasil simulasi tidak jauh berbeda terhadap nilai Pmax, namun tetap *palm oil* menjadi sorotan dengan nilai Hmin yang cukup tebal sebesar 0,6416. Gambar 10 ialah hasil *overlapping* empat *lubricants*.



Gambar 11 *Overlapping coconut oil* terhadap *mineral oil*



Gambar 12 *Overlapping olive oil* terhadap *mineral oil*



Gambar 13 *Overlapping palm oil* terhadap *mineral oil*

Pada Gambar 11, Gambar 12, dan Gambar 13 hanya terdapat dua grafik, yakni *mineral oil* dan *lubricant* yang bersangkutan seperti pada keterangan panah masing-masing gambar. Dengan memperhatikan Gambar 11 hingga Gambar 13 membuktikan bahwa *bio-based lubricants* yang terdiri dari *coconut oil*, *olive oil*, *palm oil* memiliki kemampuan, kehandalan dan kinerja yang tidak jauh berbeda terhadap *mineral oil* sebagai *lubricant* (pelumasan). *Coconut oil* dan *palm oil* memiliki karakteristik yang sama, yakni bekerja optimal pada kondisi operasional beban tinggi dengan kecepatan tinggi, sedangkan *olive oil* cenderung optimal pada saat kondisi operasional beban rendah dengan kecepatan tinggi. Bagaimanapun, ketiga *bio-based lubricants* tersebut dapat menggantikan penggunaan *mineral oil* pada pengaplikasian *cylindrical roller bearing*.

5. Simpulan

Akibat pengaruh variasi *load* dan *speed* yang diberikan, *olive oil* dikatakan bagus pada kondisi *load* (beban) rendah dengan *speed* (kecepatan) tinggi, sedangkan *coconut oil* dan *palm oil* dikatakan bagus pada kondisi *load* (beban) tinggi dengan *speed* (kecepatan) tinggi pada pengaplikasian *cylindrical roller bearing*.

Daftar Pustaka

- [1] Cupu, D. R. (2012). Numerical Analysis Of Elastohydrodynamic Lubrication With Bio-Based Fluids. *Numerical Analysis Of Elastohydrodynamic Lubrication With Bio-Based Fluids*, 3-5.
- [2] Cupu, D. R., Sheriff, J. M., & Osman, K. (2012). Bio-Based Lubricants for Numerical Solution of Elastohydrodynamic Lubrication. *Jurnal Teknologi*, 40.
- [3] Cupu, D. R., Sheriff, J. M., & Osman, K. (2012). Numerical Approach of Elastohydrodynamic Lubricated Line Contact with Seed Oils. *IJSSST*.
- [4] Mia, S., & Ohno, N. (2007). High Pressure Tribological Behavior of Vegetable Oils as Lubricants. *International Conference on Mechanical Engineering 2007*, 2-4.
- [5] Ohno, N., Shiratake, A., Kuwano, N., & Hiranob, F. (1997). Behavior of Some Vegetable Oils in EHL Contacts. *Elsevier Science*.
- [6] Venner, C. H. (1991). Multilevel Solution of The EHL Line and Point Contact Problems.
- [7] Venner, C., & Lubrecht, A. (2000). *Multilevel Method In Lubrication*. Amsterdam: Elsevier Science B.V.
- [8] SKF Group. (2018). *Roller Bearing*.
- [9] Huang, P. (2013). *Numerical Calculation of Lubrication: Methods and Program*. China: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.
- [10] Hamrock, B. J., Schmid, S. R., & Jacobson, B. O. (2004). *Fundamentals of Fluid Film Lubrication Second Edition*. New York: Marcel Dekker Inc.
- [11] Houpert, L. G., & Hamrock, B. J. (1986). Fast Approach for Calculating *Film* Thickness and Pressures in Elastohydrodynamically Lubricated Contacts at High Loads. *Journal of Tribology*.
- [12] Lugt, P., & Morales-Espejel, G. (2011). A Review of Elastohydrodynamic Theory. *Society of Tribologist and Lubrication Engineers*, 480.
- [13] Safa, M. M., Anderson, J. C., & Leather, J. A. (1982). Transducers for Pressure, Temperature and Oil *Film* Thickness Measurement in Bearings.
- [14] Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2005). *Engineering Tribology Third Edition*. United Kingdom: Elsevier Inc.