

## Pengaruh Penambahan Nano-Aditif Ke Dalam Fluida Polyolester Terhadap Gesekan Dan Keausan Material AISI52100 Vs Cast Iron

Fajar Ramadhan<sup>1</sup>, Zahrul Fuadi<sup>2\*</sup>, Rudi Kurniawan<sup>2</sup>, Dieter Rahmadiawan<sup>3</sup>,  
Arya Rudi Nasution<sup>4</sup>

<sup>1,2)</sup> Teknik Mesin dan Industri, Universitas Syiah Kuala Banda Aceh, Indonesia

<sup>3)</sup> Jurusan Teknik Mesin, Universitas Negeri Padang, Padang, Indonesia

<sup>4)</sup> Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan, Indonesia

\*Email: zahrul.fuadi@usk.ac.id

### ABSTRACT

*Synthetic lubricants have environment problems because they are difficult to decompose and become pollutant materials when disposed into the environment. Therefore, there is an increasing demand for biodegradable lubricants. One of the methods to achieve biodegradability of a lubricant is by using eco-friendly base material and nanoparticles from organic materials as additives, such as nanofibers, cellulose and graphene nanoplatelets. In previous studies, it has been confirmed that applying bacterial cellulose at various volume percentages into polyester (POE) oil has reduced friction and wear of the material up 49%. Other studies also mentioned that the addition of several layers of graphene as an additive to Polyalphaolefin (PAO) oil have decreased the value of the friction coefficient from 0.15 to 0.08. In this study, due to their desirable properties, the bacterial cellulose (BC) and graphene nanoparticles were used as additives in polyester (POE) oil. Four types of lubricant specimens with different additive content were prepared for the study. The friction tests were carried out using a reciprocating pin on disk type tribometer at temperatures of  $65^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$  and  $27^{\circ}\text{C}$ . The results indicated improvements in the tribological properties; 60% friction reduction at temperature of  $65^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$  and 66.7% at a temperature of  $27^{\circ}\text{C}$ , with the presence of both BC and graphene in POE compared to those without the additives. In addition, the wear analysis from the results of micro-surface observation of the specimen indicates the reduction of the specific wear rate values as the effect of additives. It is found that the specific wear rate decreased from  $6.09 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$  to  $4.82 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N.m}$  at  $65^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$  and from  $1.57 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$  to  $2.38 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N.m}$  at  $27^{\circ}\text{C}$  with the presence of both BC and graphene in POE compared to those without the additives.*

**Keywords:** Specific wear rate, Wear, Coefficient of friction, Environmentally friendly lubricants

### PENDAHULUAN

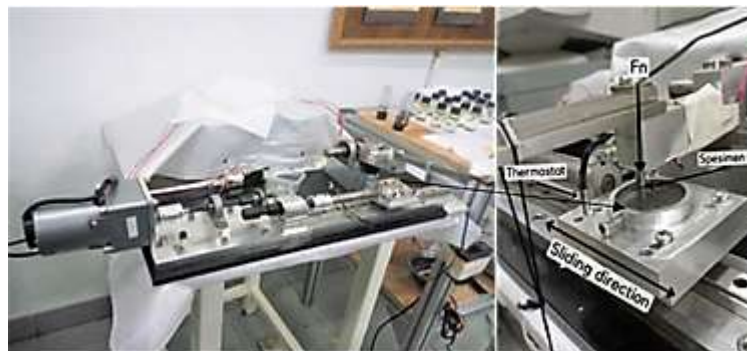
Gesekan dan keausan adalah fenomena umum yang terjadi akibat pertemuan atau kontak antara dua buah permukaan yang berinteraksi. Umumnya, hal ini dialami oleh komponen pada sistem mekanik yang dalam operasinya mengalami pergesekan secara terus-menerus, seperti bantalan, poros, roda gigi, dan sebagainya. Gesekan umumnya didefinisikan sebagai gaya berlawanan (opposing force) yang terjadi ketika dua permukaan mengalami kontak dan saling bergerak relatif satu sama lain. Gesekan yang dihasilkan ini menimbulkan kerusakan material atau kehilangan partikel yang dikenal dengan keausan, disamping menghasilkan panas dan bunyi-bunyian. Oleh karena itu, suatu permasalahan esensial pada bidang perindustrian yang perlu diselesaikan adalah bagaimana mengurangi gesekan dan aus untuk menghindari kehilangan energi yang diakibatkan.

Salah satu metode untuk mengurangi gesekan dan aus adalah dengan menggunakan pelumasan. Pada dasarnya, bahan pelumas berfungsi untuk mengurangi atau mencegah keausan berlebihan yang diakibatkan oleh kontak langsung antara satu permukaan material dengan permukaan material lainnya dalam suatu gerakan konstan [1]. Bahan pelumas yang diberikan pada dua permukaan yang bergesekan akan menempel pada permukaan dan mengurangi kontak langsung material pada permukaan kontak sehingga mengurangi gesekan dan aus. Keausan material dalam pada komponen mesin atau proses produksi secara langsung memengaruhi masa pakai dan keamanan mesin, sehingga berdampak pada efisiensi produksi. Oleh sebab itu, pengembangan bahan pelumas dan metode pelumasan banyak menarik perhatian para peneliti.

Namun demikian, bagaimana mengembangkan pelumas dengan sifat anti aus yang sangat baik merupakan masalah yang sangat kompleks dalam ilmu tribologi dan material dan memerlukan pendekatan multidisiplin [2].

Bahan pelumas dasar umumnya terbuat dari hidrokarbon, baik mineral ataupun sintetis. Pada umumnya, bahan pelumas yang banyak tersedia pada pasar komersial adalah pelumas yang berjenis bahan dasar minyak sintetis dan minyak mineral. Pelumas dengan bahan dasar minyak mineral biasanya bersumber dari minyak mentah yang terdiri dari senyawa aromatik, naftalena dan parafin. Untuk meningkatkan kualitas pelumas dan mendapatkan kinerja pelumasan yang baik, seperti sifat anti aus, stabilitas viskos, stabilitas oksidasi, bahan pelumas dasar dicampur dengan sebagian kecil aditif [3]. Namun demikian, salah satu kelemahan produk pelumas, baik mineral maupun sintetis, adalah tidak bisa terurai dan menjadi polutan saat terbuang ke lingkungan. Secara umum, 20% bahan pelumas akan terbuang ke lingkungan akibat kebocoran dan proses pembuangan [4] setiap tahunnya. Untuk mengurangi dampak lingkungan yang diakibatkan oleh hal demikian, pelumas yang bersifat ramah lingkungan perlu lebih banyak digunakan dalam industri. Bahan pelumas dasar yang ramah lingkungan dapat dibuat dari minyak tumbuhan dan hewani, atau bahan sintetis yang memiliki sifat bio-degradability yang baik. Salah satu bahan pelumas sintetis yang memiliki sifat ramah lingkungan adalah polyolester oil. Ester jenis ini lazim digunakan sebagai fluida refrigeran ataupun fluida hidrolik.

Dalam penelitian ini, dilakukan kajian eksperimental untuk menganalisa beberapa karakteristik tribologi yaitu koefisien gesekan dan laju keausan dari material logam yang dilumasi dengan pelumas ramah lingkungan polyolester oil. Dua jenis aditif digunakan pada kajian ini untuk mengetahui bagaimana pengaruhnya terhadap karakteristik gesekan dan keausan yang terjadi. Aditif tersebut adalah bacterial cellulose dan carbon nanoparticles (graphene). Koefisien gesekan diukur dengan menggunakan alat uji tribometer pin on disk dan selanjutnya laju keausan material logam dihitung dengan mengukur kehilangan aus material pada spesimen yang bergesekan. Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah untuk mengukur koefisien gesekan dan laju keausan spesifik material logam yang dilumasi dengan polyolester oil beserta dengan aditifnya serta membandingkan hasilnya dengan kondisi pelumasan yang tidak menggunakan bahan aditif.



**Gambar 1.** Tribometer pin on disk

## METODE PENELITIAN

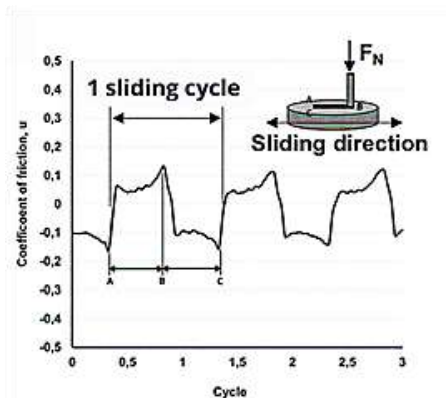
Secara prinsip, pengujian gesek adalah mengukur gaya gesekan yang terjadi antara spesimen yang bergesekan menggunakan alat tribometer. Dalam penelitian ini, tribometer yang digunakan adalah jenis pin on disk reciprocating. Pada saat beban diberikan, permukaan pin dan disk mengalami kon-tak permukaan. Kemudian ketika motor listrik dioperasikan, gesekan akan terjadi pada permukaan secara berulang-ulang dengan gerakan maju-mundur. Gaya gesekan pada permukaan gesek diukur menggunakan load cell menggunakan sepasang strain gauge yang dihubungkan dengan sistem akuisisi data (perangkat lunak Kyowa DCS-100A *Dynamic Data Acquisition*). Data yang direkam selanjutnya diolah menggunakan Ms-Excel.

Peralatan-peralatan yang digunakan untuk mendukung proses penelitian ini adalah sebagai berikut:

**a. Tribometer tipe pin on disk**

Tribometer pin on disk adalah jenis tribometer yang menggunakan pin dan lempengan disk/pelat datar sebagai material yang bergesekan. Cara kerja dari tribometer ini adalah dengan gerakan slide resiprokasi (bolak-balik linear) pada mesin yang berasal dari motor yang berputar dan dirubah oleh connecting rod. Connecting rod berfungsi mengubah gerakan rotasi motor menjadi gerakan translasi. Pada rod tersebut dihubungkan poros yang ujungnya diberi dudukan untuk meletakkan spesimen uji (disk). Gaya normal diberikan melalui beban secara gravitasi yang digantung pada lengan kantilever dan sudah dipasang pin serta strain gauge sebagai load sensor.

Gambar 2 menunjukkan grafik koefisien gesekan yang dapat dihasilkan dari data pengukuran menggunakan sistem tribometer pada Gambar 1. Gerakan 1-cycle (1 siklus) pada Gambar 2 adalah gerakan pada lintasan A-B-C (gerakan maju-mundur). Pada gambar tersebut terlihat bahwa dalam 1 siklus, koefisien gesekan memiliki kuantitas nilai positif dan negatif. Nilai positif diperoleh dari gerakan arah maju sedangkan nilai negatif diperoleh dari gerakan arah sebaliknya. Satu siklus penuh memiliki jarak lintasan 15 mm.



**Gambar 2.** Grafik koefisien gesekan yang membentuk kurva

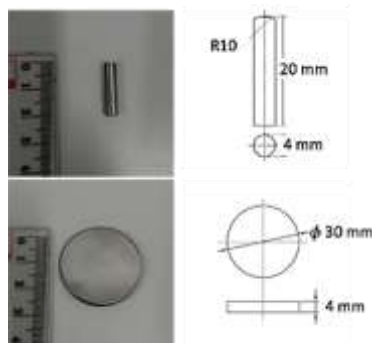
**Tabel 1.** Komposisi kimia spesimen uji

Material	Komposisi Kimia, %					
	Fe	C	Si	Mn	S	P
Cast iron	92-94	3.25-3.5	2	0.6	<0.15	<0.1
AISI 52100	96.5-97	0.9-1.1	0.15-0.3	0.2-0.45	<0.025	<0.025

**b. Spesimen pin dan disk**

Pada penelitian ini, spesimen uji yang digunakan terbuat dari material yang berbeda, yaitu AISI52100 untuk spesimen pin dan cast iron untuk material disk. Pemilihan material tersebut dikarenakan kedua material tersebut adalah material yang umum digunakan sebagai material komponen sistem mekanik seperti bearing, ball screw, slide rail, cylinder liner, dan komponen sistem mekanik lainnya.

Spesimen pin memiliki dimensi panjang 20 mm dan diameter 4 mm. Salah satu ujung pin dibentuk menggunakan kertas grit sehingga memiliki dimensi hemispherical dengan diameter 10 mm. Sedangkan spesimen disk memiliki dimensi dengan ketebalan 4 mm dan diameter 30 mm. Permukaan disk dan pin diratakan dengan menggunakan kertas grit secara bertahap mulai #400 sampai dengan #10000 kemudian diakhiri dengan metal polish paste hingga permukaan kontak spesimen mendekati kondisi mirror polished. Dimensi spesimen pin dan disk ditunjukkan pada Gambar 3. Sedangkan komposisi kimia kedua material tersebut ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 3. Spesimen pin dan disk

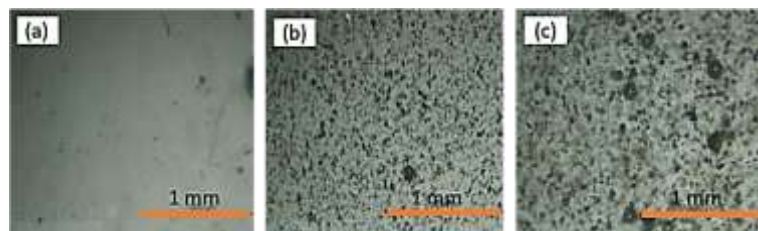
### c. Pelumas (*lubricant*)

Pada penelitian ini digunakan empat varian spesimen pelumas, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Pelumas varian pertama adalah Polyolester (POE) oil. POE adalah fluida hidraulik yang tersedia di pasar komersial dan biasanya digunakan sebagai refrigeran pada mesin pendingin udara. POE digunakan sebagai bahan pelumas dasar karena sifatnya yang ramah lingkungan. Fluida pelumas POE ini disebut dengan varian P1. Selanjutnya, varian P2 adalah POE yang dicampurkan dengan aditif berupa serbuk bacterial cellulose (BC). Serbuk BC merupakan selulosa yang berasal dari proses peragian, yang sering disebut sebagai nata-de-coco. Karakteristik BC yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada rujukan [5]. Pelumas P2 dibuat dengan menambahkan 150 mg partikel bacterial cellulose yang terdispersi ke dalam 50 ml polyolester oil atau 0.3% fraksi volum.



Gambar 4. Spesimen pelumas yang digunakan; P1: *Polyolester* (POE) oil, P2: POE + *bacterial cel-lulose*, P3: POE + *carbon nanoparticles (graphene)*, P4: POE + *bacterial cellulose + carbon nano-particles (graphene)*

Pelumas varian P3 adalah POE yang dicampurkan dengan partikel graphene. Pelumas P3 mengandung 10 mg partikel graphene yang terdispersi ke dalam 50 ml POE oil. Sedangkan pelumas P4 dibuat dengan menambahkan 10 mg graphene pada sampel pelumas varian P2. Untuk mendapatkan campuran yang baik, pelumas varian P2, P3, dan P4 diletakkan di dalam ultrasonic bath selama 1 jam. Hal ini dilakukan supaya aditif pada ketiga varian pelumas tersebut terdispersi secara merata dan seragam ke seluruh campuran serta dapat memecah partikel aditif BC dan graphene ke dalam ukuran yang lebih kecil sehingga stabilitas dispersi menjadi lebih baik.



Gambar 5. Foto mikroskopis pelumas dengan campuran POE + BC (a), POE + *graphene* (b), dan POE + BC + *graphiene* (c)

Gambar 5 menunjukkan gambar fisik varian pelumas P2 (Gambar 5(a)), P3 (Gambar 5(b)), dan P4 (Gambar 5(c)). Partikel BC berwarna keputihan sehingga partikelnya tidak terlalu tampak pada

gambar. Kestabilan campuran P2 terlihat cukup baik karena tidak terlihat adanya gumpalan. Pada Gambar 5(b), terlihat partikel *graphene* tercampur dengan cukup baik dan merata, namun ukurannya terlihat kurang seragam. Sedangkan pada varian P4 terlihat adanya gumpalan pada partikel aditif *graphene* dan BC. Untuk mengetahui kondisi stabilitas pelumas lebih lanjut, dilakukan pengamatan kondisi pengendapan statis, yaitu pelumas diletakkan pada kondisi tetap dan dilakukan pengambilan gambar secara berkala.

**Tabel 2.** Kondisi pengujian

Kondisi	Satuan	Nilai
Kecepatan gesekan, v	mm/s	10.2
Waktu pengujian, t	menit	240
Beban normal, N	N	9.8
Temperatur, T	°C	65 ±3 dan 27
Sampling frequency	Hz	10

**d. Kondisi dan parameter pengujian**

Uji gesekan dilakukan pada berbagai kondisi pengujian, seperti ditunjukkan pada Tabel 2 dan Tabel 3. Pengujian dilakukan pada dua temperatur kerja yang berbeda, yaitu temperatur kamar, 27°C, dan temperatur 65 °C. Temperatur 65 °C dipilih karena temperatur tersebut mendekati temperatur kerja fluida POE pada kondisi aplikasi sebenarnya. Sedangkan kondisi operasional lainnya, yaitu kecepatan dan beban normal dipilih untuk menghasilkan kondisi yang sesuai untuk menghasilkan kontak permukaan pada kondisi pelumasan batas (boundary lubrication). Dengan kombinasi parameter yang ditentukan, keseluruhan penelitian dilakukan sebanyak delapan kali pengujian.

**Tabel 3.** Parameter pengujian

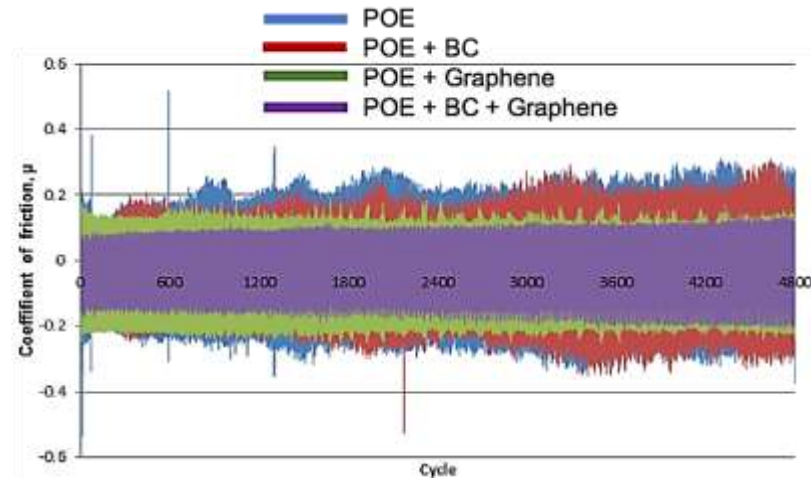
No	Pin	Disk	Beban (N)	Kecepatan Gesekan, v (mm/s)	Pelumas	T (°C)
1.	AISI 52100	Cast iron	9.8	10.2	P1	65 ±3
2.	AISI 52100	Cast iron	9.8	10.2	P2	65 ±3
3.	AISI 52100	Cast iron	9.8	10.2	P3	65 ±3
4.	AISI 52100	Cast iron	9.8	10.2	P4	65 ±3
5.	AISI 52100	Cast iron	9.8	10.2	P1	27
6.	AISI 52100	Cast iron	9.8	10.2	P2	27
7.	AISI 52100	Cast iron	9.8	10.2	P3	27
8.	AISI 52100	Cast iron	9.8	10.2	P4	27

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

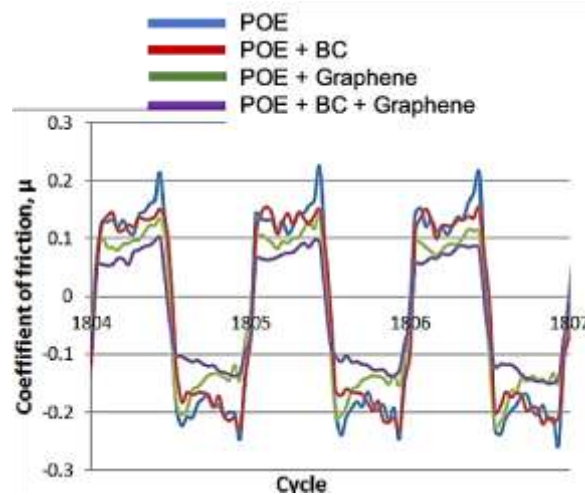
**1. Koefisien gesekan**

Gambar 6 menunjukkan data koefisien gesekan yang diperoleh melalui pengujian menggunakan tribometer pin on disk reciprocating dengan beban sebesar 9.8 N, kecepatan gesekan 10.2 mm/s dan temperatur pengujian 65°±3°C. Pada pengujian ini, temperatur pengujian agak berfluktuasi diakibatkan sensitivitas sensor pemanas yang belum presisi. Keseluruhan pengujian dilakukan dalam 4800 siklus gesekan yang memberikan jarak gesek keseluruhan sebesar 72 meter. Dari gambar ini terlihat secara keseluruhan bahwa koefisien gesekan terkecil diperoleh pada varian spesimen pelumas P4: POE+BC+graphene, sementara koefisien gesekan tertinggi diperoleh pada varian spesimen pelumas P1: POE.



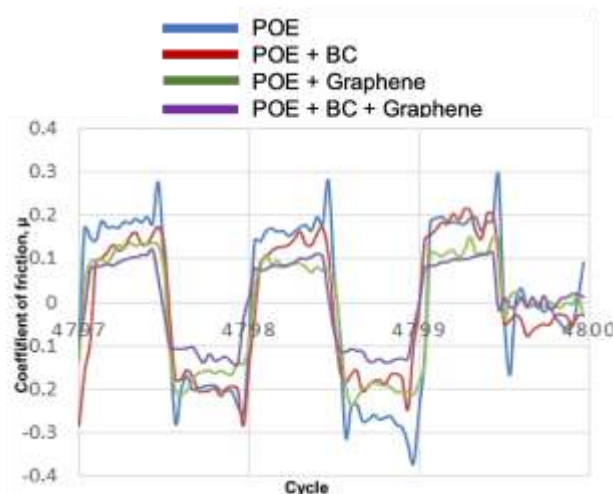


Gambar 6. Hasil uji gesekan sebanyak 4800 siklus pada temperatur  $65^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$

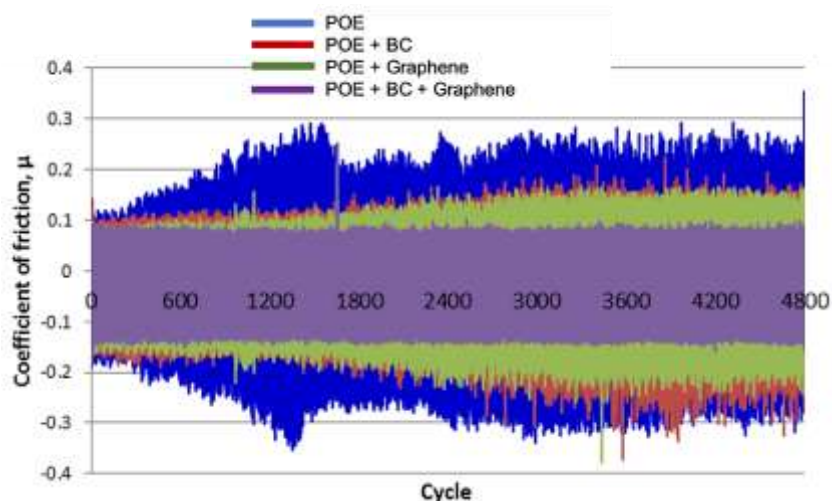


Gambar 7. Grafik koefisien gesekan siklus 1804-1807 pada temperatur  $65^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$

Gambar 8 menunjukkan kondisi koefisien gesekan pada siklus 4797 sampai dengan 4800, atau pada jarak gesekan 72 meter. Disini terlihat bahwa pada kondisi varian spesimen P3 dan P4, angka koefisien gesekan tetap berada pada kisaran 0.1, sedangkan pada kondisi P1 dan P2, koefisien gesekan menjadi semakin besar dengan nilai tertinggi 0.18 untuk P2 dan 0.29 untuk P1.

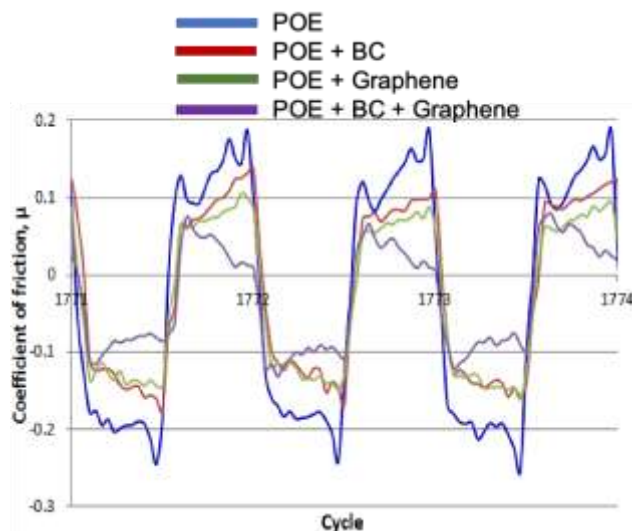


Gambar 8. Grafik koefisien gesekan siklus 4797-4800 pada temperatur  $65^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$



Gambar 9. Grafik koefisien gesekan siklus 0-4800 pada temperatur 27°C

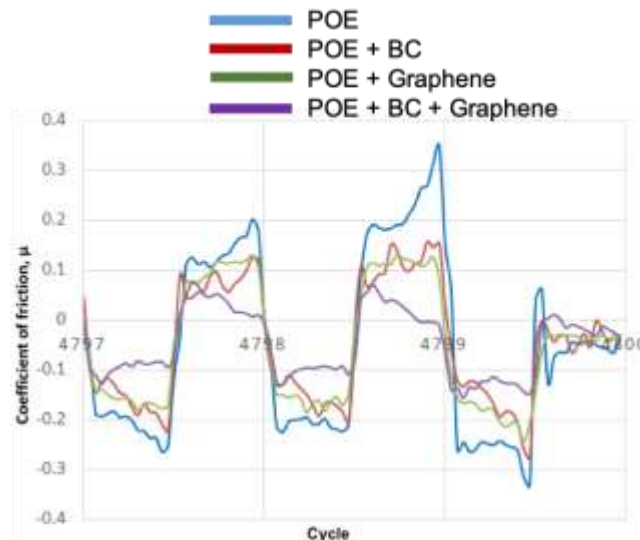
Hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 6 sampai dengan Gambar 8 dilakukan pada temperatur kerja  $65^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$ . Untuk melihat pengaruh temperatur terhadap kinerja bahan pelumas, pengujian dilakukan juga pada temperatur 27 °C. Hasil pengujian pada kondisi ini ditunjukkan pada Gambar 9 sampai dengan Gambar 11.



Gambar 10. Grafik koefisien gesekan siklus 1771-1774 pada temperatur 27°C

Gambar 9 menunjukkan kurva koefisien gesekan secara keseluruhan sejauh jarak gesekan sebesar 72 meter. Kurva tersebut menunjukkan perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan hasil pengujian pada temperatur 65 °C (Gambar 6). Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa koefisien gesekan pada kondisi pelumas varian P1 naik secara cepat dan tetap berada pada kisaran nilai 0.25 sepanjang pengujian. Sedangkan varian pelumas P2 dan P3 memiliki karakteristik kurva gesekan yang sama, yaitu naik secara perlahan mulai dari nilai 0.1 pada permulaan gesekan sehingga 0.12 pada akhir pengujian. Kondisi ini berbeda dengan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 6, dimana karakteristik gesekan varian P2 dan P3 berbeda satu sama lainnya. Perbedaan ini juga ditunjukkan oleh varian pelumas P4 pada kedua kondisi pengujian. Pada temperatur 27 °C, varian P4 menunjukkan karakteristik gesekan yang tetap dibawah angka 0.1 dan cenderung menurun seiring jarak gesekan. Sementara itu, pada kondisi 65 °C, koefisien gesekan varian P4 cenderung bertambah besar seiring jarak gesekan. Secara lebih detail, karakteristik ini dapat dilihat pada Gambar 10, yaitu pada jarak gesekan 26 meter dan Gambar 11 pada jarak gesekan 72 meter.

Secara umum, hal ini menunjukkan bahwa temperatur berpengaruh secara signifikan terhadap karakteristik gesekan material yang dilumasi oleh berbagai varian perlumas tersebut. Hal ini mungkin diakibatkan oleh perubahan pada nilai viskositas, oksidasi, ataupun karakteristik lapisan tribofilm yang terbentuk pada permukaan. Oleh karena itu, pengujian lebih lanjut untuk mengetahui lebih detail tentang penyebab perumahan karakteristik gesek masih perlu dilakukan.



Gambar 11. Grafik koefisien gesekan siklus 4797-4800 pada temperatur 27°C

Secara umum, penelitian ini memperlihatkan bahwa pemakaian aditif BC dan graphene pada bahan dasar POE menghasilkan pengurangan gesekan yang signifikan. Dapat diperhatikan, semua spesimen pelumas P2, P3, dan P4, memberikan nilai koefisien gesekan kurang dari 0.2 sejak awal sliding. Kehadiran graphene dalam POE (P2) mengurangi COF menjadi 0.15. Kemudian, POE yang mengandung BC dan graphene, P4, menghasilkan COF terendah dengan nilai COF kurang dari 0.1 pada seluruh siklus. Dari hasil pengujian dengan dua kondisi temperatur yang berbeda, keberadaan partikel bacterial cellulose (BC) dan graphene telah meningkatkan kinerja tribologi pelumas POE.

## 2. Specific Wear Rate (SWR)

Pengamatan keausan dilakukan dengan menggunakan mikroskop digital, yaitu dengan mengukur diameter aus pada pin. Gambar 12 menunjukkan kondisi keausan material pada temperatur pengujian 65 °C sedangkan Gambar 13 pada kondisi pengujian 27 °C. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan yang signifikan pada kondisi keausan yang diakibatkan oleh adanya berbagai aditif di dalam POE, ataupun diakibatkan oleh perbedaan temperatur kerja.

Besaran diameter aus pada spesimen pin digunakan untuk menghitung tingkat keausan spesifik (specific wear rate). Hal ini dilakukan karena pin mengalami kontak secara terus menerus pada posisi yang sama selama pengujian gesekan. Berdasarkan prosedur standar ASTM G99-17, specific wear rate didefinisikan menggunakan Persamaan (1) sebagai berikut:

$$K = \frac{\Delta V}{F \times S} \quad (1)$$

Dimana:

$K$  = Specific wear rate ( $\text{mm}^3/\text{N.m}$ )

$\Delta V$  = Volum keausan ( $\text{mm}^3$ )

$F$  = Beban (N)

$S$  = Jarak Gesekan (m)

Sedangkan volum keausan ( $\Delta V$ ) pada pin dapat dihitung dengan Persamaan (2) sebagai berikut:



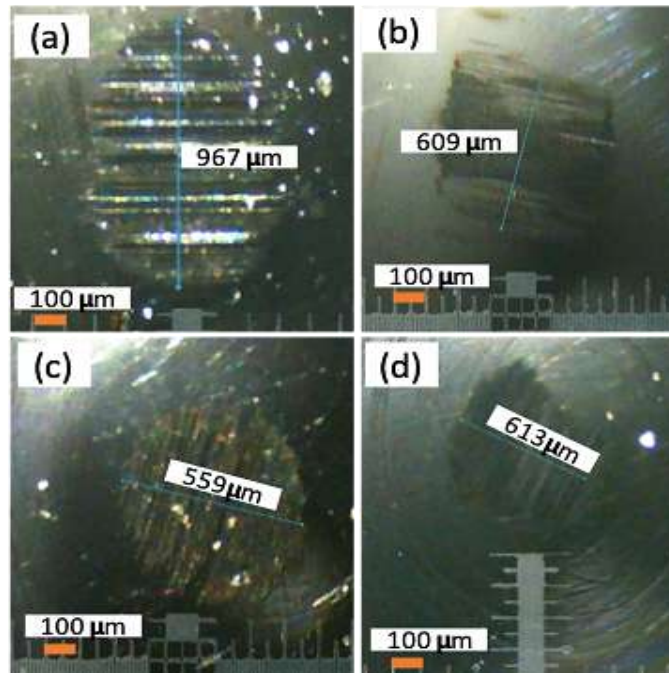
$$\Delta V = \left( \frac{\pi h}{6} \right) \left[ \frac{3d^2}{4+h^2} \right] \quad (2)$$

Dimana:

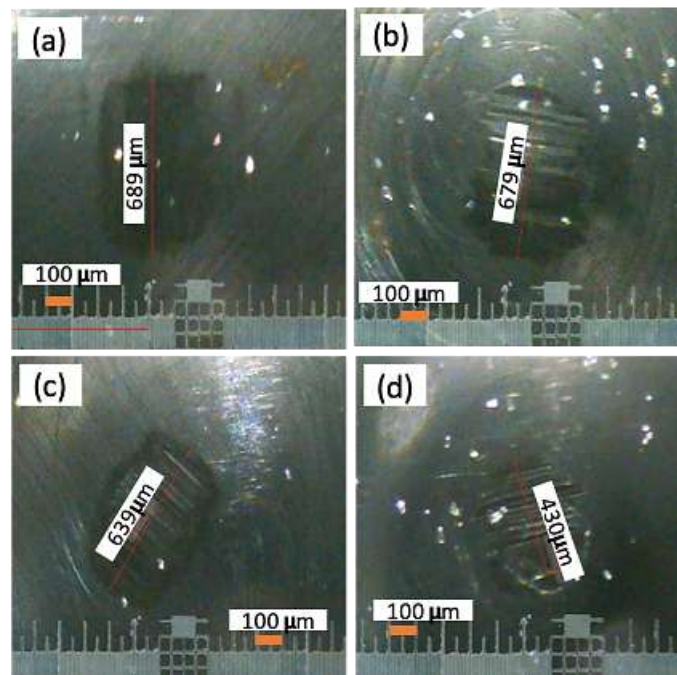
$$h = r - [r^2 - d^2/4]^{1/2}$$

$d$  = diameter keausan (mm)

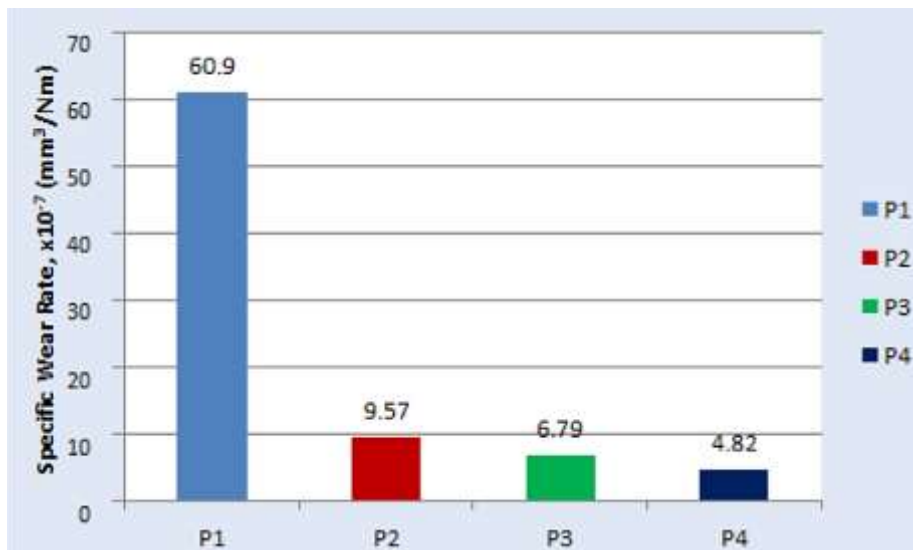
$r$  = radius pin (mm)



Gambar 12. Keausan material spesimen pin dengan pengujian pada temperatur  $65^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$  (a) P1 (b) P2 (c) P3 dan (d) P4



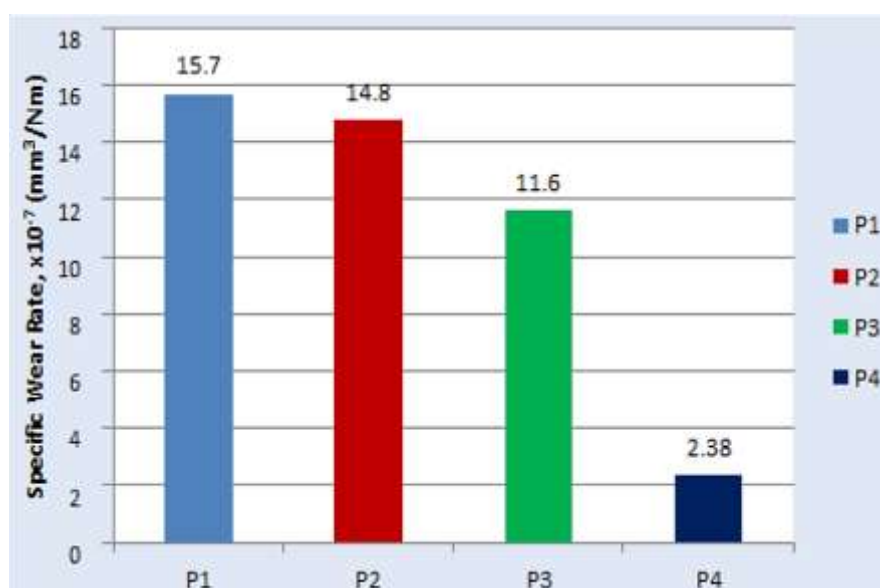
Gambar 13. Keausan material spesimen pin dengan pengujian pada temperatur  $27^{\circ}\text{C}$  (a) P1 (b) P2 (c) P3 dan (d) P4



Gambar 14. Perbandingan specific wear rate pada uji dengan temperatur 65°±3°C

Gambar 14 menunjukkan nilai SWR pada kondisi pengujian 65°±3°C. Nilai SWR tertinggi didapatkan dari pengujian pelumas P1 (POE) dengan nilai  $6.09 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/N.m, selanjutnya dengan pengujian menggunakan pelumas P2 (POE + bacterial cellulose) dengan nilai  $9.57 \times 10^{-7}$  mm<sup>3</sup>/N.m. SWR pada kondisi varian pelumas P3 (POE + graphene) memiliki nilai  $6.79 \times 10^{-7}$  mm<sup>3</sup>/N.m, sementara nilai SWR paling rendah didapatkan dari uji pelumas varian P4 (POE + bacterial cellulose + graphene) dengan nilai  $4.82 \times 10^{-7}$  mm<sup>3</sup>/N.m.

Pada kondisi pengujian 27°C, nilai SWR dapat dilihat pada Gambar 15. Dari gambar tersebut didapatkan nilai SWR tertinggi pada varian pelumas P1 (POE) dengan nilai  $1.57 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/N.m, disusul pada kondisi pelumas P2 (POE + bacterial cellulose) yang memiliki nilai SWR  $1.48 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/N.m yang tidak berbeda jauh dengan kondisi pelumas varian P1. Pada varian pelumas P3 (POE + graphene), nilai SWR yang diperoleh sebesar  $1.16 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/N.m. Nilai SWR paling rendah didapatkan dari varian pelumas P4 (POE + bacterial cellulose + graphene) dengan nilai  $2.38 \times 10^{-7}$  mm<sup>3</sup>/N.m.



Gambar 15. Perbandingan specific wear rate pada uji dengan temperatur 27°C

Kuantitas SWR yang diperoleh pada perhitungan sejalan dengan hasil pengukuran gesekan yang dilakukan. Disini terlihat bahwa SWR terkecil diperoleh pada kondisi pelumasan menggunakan varian pelumas dengan campuran aditif BC dan graphene. Perbedaan SWR terlihat secara signifikan pada pengujian temperatur kamar, dimana kondisi P4 jauh lebih kecil dibandingkan dengan kondisi P1, P2, ataupun P3. Hal ini menunjukkan peran yang penting dari partikel BC dan graphene yang secara bersama-sama memberikan efek sinergis terhadap karakteristik pelumasan sehingga melindungi material logam dari aus yang berlebihan. Efek sinergi semacam ini telah dilaporkan oleh peneliti sebelumnya antara lain yang lain seperti [6].

Pada kondisi pelumasan temperatur yang lebih tinggi, pengaruh partikel BC dan graphene menjadi lebih signifikan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 14. Hal ini menunjukkan kemungkinan pengaruh temperatur terhadap sifat fisik pelumas. Pengaruh ini antara lain dapat berupa kondisi dimana campuran partikel aditif di dalam POE menjadi lebih baik pada temperatur yang relatif tinggi, sehingga stabilitas menjadi lebih baik. Dalam kondisi stabilitas dan campuran yang lebih baik, lebih mudah bagi partikel aditif untuk masuk ke pori-pori permukaan untuk membentuk lapisan pelindung aus. Proses semacam ini dinamakan efek mending, seperti dilaporkan pada beberapa penelitian sebelumnya [7][8]. Walaupun demikian, analisis yang lebih lanjut dan mendalam perlu dilakukan untuk lebih memperjelas mekanisme yang terjadi.

### KESIMPULAN

Berdasarkan dari hasil yang didapat dari pengujian yang telah dilakukan, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada pengujian dengan temperatur  $65^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$ , pencampuran bacterial cellulose dalam POE mengurangi nilai koefisien gesekan dari 0.3 menjadi 0.27, sedangkan pencampuran graphene dalam POE mengurangi nilai koefisien gesekan dari 0.3 menjadi 0.17. Kemudian, pencampuran bacterial cellulose dan graphene dalam POE telah menghasilkan penurunan nilai dari 0.3 menjadi 0.12. Pada pengujian dengan temperatur  $27^{\circ}\text{C}$ , pencampuran bacterial cellulose dalam POE mengurangi nilai koefisien gesekan dari 0.27 menjadi 0.17 dan menjadi 0.15 pada pencampuran graphene ke dalam POE. Sedangkan pencampuran bacterial cellulose dan graphene dalam POE mengurangi nilai koefisien gesekan dari 0.27 menjadi 0.09. Hal ini menunjukkan peran yang signifikan dari aditif BC dan graphene terhadap karakteristik pelumasan POE.
2. Aditif BC dan graphene juga memberikan pengaruh yang signifikan terhadap specific wear rate (SWR) material gesek. Pada pengujian dengan temperatur  $65^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$ , adanya campuran bacterial cellulose dan graphene telah mengurangi SWR dari  $6.09 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  menjadi  $4.82 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  artinya terjadi penurunan sebesar 92%. Sedangkan pada pengujian dengan temperatur  $27^{\circ}\text{C}$  telah mengurangi SWR dari  $1.57 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  menjadi  $2.38 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  artinya terjadi penurunan sebesar 84.8%
3. Penelitian ini menunjukkan bahwa aditif BC dan graphene dapat meningkatkan performa pelumas POE secara signifikan. Namun demikian, masih perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui komposisi yang optimal dan mekanisme yang melatarbelakangi penurunan gesekan dan SWR.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterimakasih dan memberikan penghargaan setinggi-tingginya kepada semua pihak yang terlibat dalam penelitian ini. Penelitian ini dilakukan dengan pendanaan yang disediakan oleh Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia melalui skema Penelitian Dasar No. 19/UN11.2.1/PT.01.03/DRPM/2022.

**DAFTAR PUSTAKA**

- [1] E. Kurnia Ningsih and K. Yusuf, "Studi Eksperimen Dan Analisa Keausan Journal Bearing Dry Contact Pada Rotary Valve Mesin Pembuat Pasta," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 1, pp. 2301–9271, 2016.
- [2] Z. Wan, Q. De Wang, D. Liu, and J. Liang, "Discovery of ester lubricants with low coefficient of friction on material surface via machine learning," *Chem. Phys. Lett.*, vol. 773, 2021, doi: 10.1016/j.cplett.2021.138589.
- [3] N. Corporation, "Lubricant Additives - A Practical Guide," *Mach. Lubr.*, no. Vi, 2018.
- [4] R. Shah, M. Woydt, and S. Zhang, "The economic and environmental significance of sustainable lubricants," *Lubricants*, vol. 9, no. 2, 2021, doi: 10.3390/lubricants9020021.
- [5] D. Rahmadiawan, H. Abrial, N. Nasruddin, and Z. Fuadi, "Stability, Viscosity, and Tribology Properties of Polyol Ester Oil-Based Biolubricant Filled with TEMPO-Oxidized Bacterial Cellulose Nanofiber," *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2021, p. 5536047, 2021, doi: 10.1155/2021/5536047.
- [6] J. Zhao, Y. Huang, Y. He, and Y. Shi, "Nanolubricant additives: A review," *Friction*, vol. 9, no. 5. 2021, doi: 10.1007/s40544-020-0450-8.
- [7] K. Li et al., "Friction reduction and viscosity modification of cellulose nanocrystals as biolubricant additives in polyalphaolefin oil," *Carbohydr. Polym.*, vol. 220, no. February, pp. 228–235, 2019, doi: 10.1016/j.carbpol.2019.05.072.
- [8] Nasution, A. R., Affandi, A., Umurani, K., & Siregar, A. M. (2021). Analisis Kekasaran Permukaan Cast Iron Menggunakan Cairan Pendingin Berbasis Nabati Pada Proses Face milling. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, 4(2), 125-131.