

## Desain dan aplikasi alat uji tribometer bolak-balik sederhana sebagai alat bantu pendidikan dan riset dasar kajian ilmu Tribologi

Zahrul Fuadi<sup>a,\*</sup>, Ayu Maulida<sup>b</sup>, Rudi Kurniawan<sup>a</sup>, Arhami Arhami<sup>a</sup>,

<sup>a</sup>Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh

<sup>b</sup>Program Studi Sarjana Teknik Mesin, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh

\*[zahrul.fuadi@usk.ac.id](mailto:zahrul.fuadi@usk.ac.id)

### ABSTRACT

Friction and wear are two common phenomena occurring in daily life; for example, the scuffing between the sole of the shoe and the floor causes wear of the sole. In mechanical engineering, friction and wear are critical phenomena because they affect the engine's efficiency, from combustion engines, powertrain systems, and mechanical components in electric vehicle systems. The energy losses caused by friction and wear are estimated to reach 3% of GDP annually. A tribometer is a test equipment used to measure the friction and wear of two interacting surfaces relative to each other, playing a vital role in the design of material, surface engineering, coatings, and lubricants to produce effective and efficient tribo-systems. One of the drawbacks of commercial tribometer equipment is its relatively high price. This paper describes the design of a simple tribometer test device that can be used to measure the friction coefficient of a tribo-pair. The tribometer is a pin-on-disk type, designed with compliance to ASTM G133-22: Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear. This tribometer has reciprocating motion and is designed using simple components that can be purchased on the market or self-produced at relatively low prices. The tribometer can be used for educational purposes as test equipment for fundamental mechanical phenomena or basic research on the wear and lubrication performance of a tribo-pair. Despite its simplicity, test results obtained by the equipment have been used in several publications in internationally reputable journals.

**Keywords:** pin-on-disk tribometer, reciprocating, friction coefficient, dry and lubricated friction, wear

**Received** 30 September 2023; **Presented** 5 October 2023; **Publication** 27 May 2024

### PENDAHULUAN

Tribologi didefinisikan sebagai ilmu dan teknologi yang mempelajari karakteristik permukaan yang saling berinteraksi dengan adanya gerakan relatif dari objek yang saling bersentuhan. Aplikasi tribologi dapat dijumpai secara umum dalam kehidupan sehari-hari, seperti gesekan antara sepatu dan lantai dan gesekan antara permukaan kampas dan tromol rem pada kendaraan bermotor. Gesekan dua permukaan tersebut akan menimbulkan pengikisan permukaan dari salah satu ataupun kedua komponen tersebut yang mengakibatkan turunnya kinerja ataupun fungsi dari komponen akibat perubahan dimensi yang menurunkan presisi atau efektifitas komponen tersebut. Rugi-rugi yang diakibatkan oleh masalah tribologi menyebabkan kehilangan mencapai 3% dari GDP dunia [1]. Berbagai metode telah dilakukan untuk mengurangi rugi-rugi tersebut, antara lain dengan menggunakan teknologi pelumasan untuk mengurangi gesekan, seperti penggunaan material berukuran

nano sebagai aditif pelumas [2]–[4], serta teknologi pelapis permukaan untuk mengurangi aus permukaan [5].

Perkembangan dalam bidang ilmu tribologi memerlukan pendekatan interdisiplin bidang ilmu serta bertumpu pada pendekatan eksperimen. Interaksi yang kompleks dari dua permukaan yang berinteraksi di bawah suatu kondisi tertentu perlu dikaji secara teknis di bawah kondisi pengujian lapangan tertentu serta hasilnya dicatat secara elektronik. Masalah tribologi yang rumit seringkali hanya dapat dipahami serta ditemukan solusinya melalui data eksperimen yang diperoleh di laboratorium [6] menggunakan perangkat tribometer.

Tribometer, atau dikenal juga dengan nama *tribotester* adalah nama umum yang diberikan pada suatu perangkat atau mesin yang dipakai untuk melakukan pengujian dan simulasi gesekan, keausan, dan pelumasan. Parameter utama yang diperoleh pada uji tribometer adalah gaya gesekan. Selanjutnya, spesimen yang digunakan

pada pengujian, yaitu material gesek dan pelumas, dapat dilakukan analisis lebih detil untuk mengetahui karakteristik keausan dan pelumasan yang terjadi. Dengan demikian, performa suatu material baru hasil pengembangan, baik material gesek ataupun pelumas, dapat dioptimalkan untuk menentukan kombinasi yang sesuai sebelum diterapkan pada aplikasi sesungguhnya. Umumnya, suatu perangkat tribometer memiliki fungsi yang sangat spesifik dan dibuat khusus untuk menguji dan menganalisis kinerja komponen atau produk tertentu dalam jangka panjang [6].

Disebabkan spesifikasinya yang khusus, tribometer yang tersedia secara komersial umumnya memiliki harga yang relatif mahal. Di lain pihak, di Indonesia terdapat berbagai bahan alami asli yang memiliki potensi tinggi sebagai bahan pelumas terbaru. Potensi ini perlu digali lebih dalam dengan menggunakan perangkat tribometer. Namun demikian, saat ini masih dapat kendala akses terhadap tribometer yang representatif akibat jumlahnya yang terbatas. Untuk mengatasi hal ini, berbagai desain tribometer dengan konstruksi yang sederhana telah dibuat, antara lain yang berbasis sistem kontak *disc on disc* [7].

Makalah ini memaparkan suatu rancang bangun tribometer berbasis pin-on-disk dengan gerakan translasi bolak-balik yang dapat digunakan untuk mengkaji karakteristik gesek dan aus dari berbagai pasangan material, baik dalam kondisi kering ataupun dengan adanya pelumas. Tribometer ini menggunakan penggerak motor *step-per* yang dapat mengubah kecepatan gesekan dan dilengkapi dengan sensor gaya untuk mengukur gaya gesekan bolak-balik yang terjadi di bawah gaya normal tertentu yang diaplikasikan secara gravitasi, baik dengan atau tanpa pelumasan pada permukaan gesek.

## METODE PENELITIAN

Kontrol terhadap gesekan dan aus adalah masalah utama yang dihadapi pada berbagai industri. Di lain pihak, perkembangan material baru yang diaplikasikan pada sistem mekanik yang mengalami gesekan dan aus juga memerlukan pengujian untuk menguji karakteristiknya sebelum diaplikasikan pada kondisi sebenarnya. Diantara berbagai aplikasi yang memerlukan kajian tribologi adalah material baru, pelumas baru dan aditifnya, serta keandalan sistem.

Perangkat uji tribometer yang paling banyak digunakan adalah jenis pin atau bola yang ditekan di atas sebuah permukaan datar yang berbentuk plat ataupun cakera (disk). Pengujian dapat dioperasikan dengan ataupun tanpa pelumas pada permukaan. Selain daripada menguji karakteristik gesek dan aus material, tribometer juga dapat mengukur karakteristik pelumasan.

Salah satu standar untuk pengujian gesekan dan aus adalah standar ASTM G133-22, dimana benda uji dalam posisi stationer berbentuk pin atau bola ditekan terhadap permukaan benda uji lain yang bergerak secara rotasional ataupun bolak-balik. Baik gerakan rotasional kontinyu ataupun gerakan bolak-balik (resiprok) memiliki keunggulan tertentu dan mensimulasikan gerakan sememangnya yang umum terjadi dalam suatu sistem mekanik.

Dalam makalah ini, tribometer yang di desain memiliki gerakan bolak-balik (resiprok). Gerakan ini memungkinkan reproduksi gesekan linear yang banyak ditemui dalam kasus nyata seperti gesekan pada piston atau komponen hidraulik. Salah satu keunggulan sistem resiprok adalah memungkinkan simulasi variasi koefisien gesekan terhadap kecepatan gesek serta perbedaan koefisien gesekan statis dan dinamis yang lebih kentara.

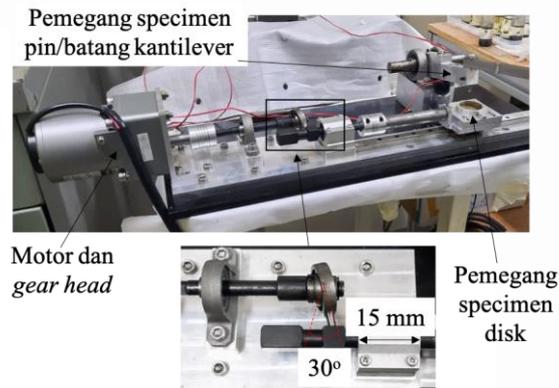
Tribometer yang dirancang ditunjukkan pada Gambar 1. Tribometer memiliki beberapa komponen utama yaitu motor penggerak, bantalan *swash* yang berfungsi mengubah gerakan rotasional menjadi translasional, pemegang spesimen disk, pemegang spesimen pin yang terhubung dengan batang kantilever, dan bantalan penunpu batang kantilever. Spesifikasi teknis tribometer yang dirancang diberikan pada Tabel 1.

### 1. Konverter gerakan

Tribometer ini mengubah gerakan rotasi menjadi gerakan translasi dengan menggunakan bantalan *swash*, seperti ditunjukkan Gambar 2. Bantalan ini memiliki gerakan  $30^\circ$  sehingga mengkonversi gerakan rotasi menjadi translasi dengan jarak 15 mm secara reciprok (bolak-balik). Untuk mengurangi hentakan selama operasi, digunakan dua unit konektor fleksibel.

Hubungan kecepatan putaran motor dengan kecepatan translasi diberikan pada Gambar 3. Kecepatan putaran motor dapat diatur dengan menggunakan servo dengan tingkat perubahan sebesar 1 rpm. Untuk mendapatkan kecepatan

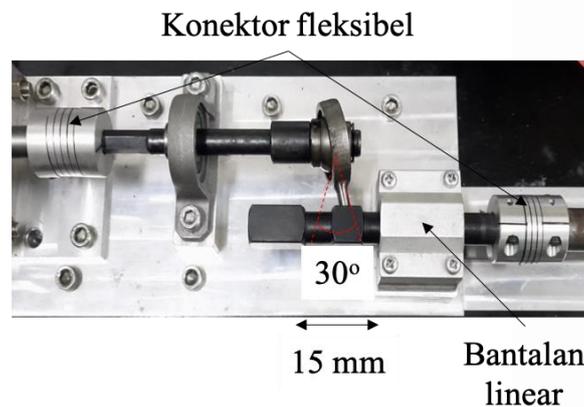
translasi yang relatif rendah, kecepatan putaran motor direduksi dengan satu unit gear head dengan perbandingan reduksi 1:5.



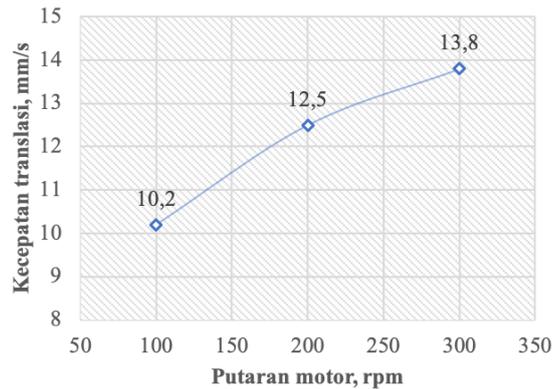
Gambar 1. Tribometer pin-on-disk resiprok dengan gerakan translasi 15 mm.

Tabel 1. Spesifikasi tribometer yang dirancang

Spesifikasi	Nilai
Daya Motor	15 W, 220-240V
Putaran Maksimum	1200 rpm
<i>Gear Head Ratio</i>	1:5
Panjang gerakan translasi	15 mm



Gambar 2. Sistem konversi gerakan dari rotasional menjadi translasi bolak-balik

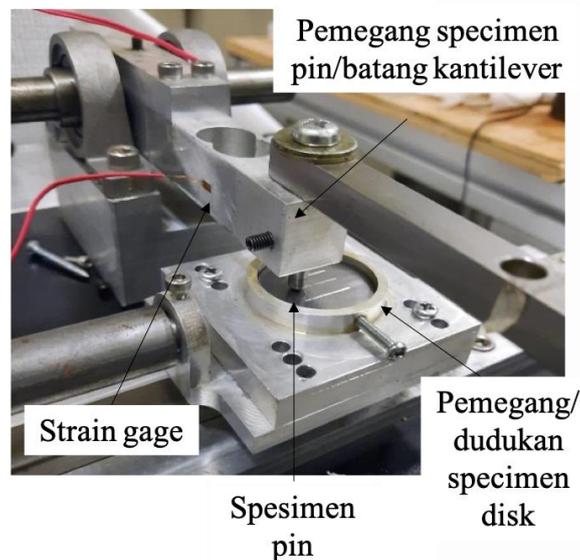


Gambar 3. Hubungan putaran motor dengan kecepatan translasi

## 2. Pemegang/dudukan spesimen dan kantilever gaya

Tribometer ini menggunakan spesimen gesek dengan dimensi pin berdiameter 4 mm dan panjang 20 mm. Sedangkan spesimen disk memiliki diameter 50 mm dengan ketebalan 4 mm. Spesimen disk dapat diletakkan pada dudukan disk, seperti ditunjukkan Gambar 4 dan dikunci pada

tempatnyanya dengan menggunakan baut diameter 2 mm. Sejumlah kecil fluida pelumas dapat diberikan pada wadah di dalam dudukan disk. Meskipun dengan volume relatif sedikit, jumlah fluida pelumas yang dapat diberikan dianggap memadai untuk pengujian pada tekanan kontak relatif tinggi pada kecepatan rendah (kondisi pelumasan batas).

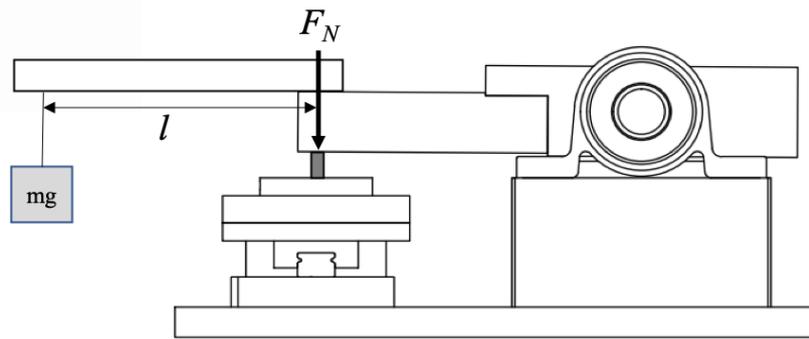


Gambar 4. Sistem dudukan spesimen dan batang kantilever gaya pada model tribometer bolak-balik

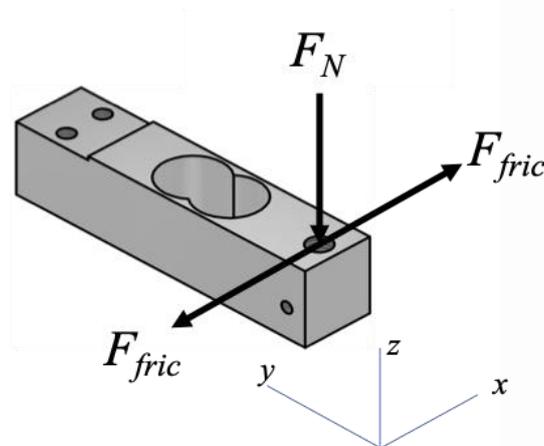
Sementara itu, spesimen pin dipasang pada batang kantilever yang dapat juga dikunci dengan menggunakan baut berukuran 2 mm (Gambar 4). Baik spesimen pin maupun disk perlu dilakukan persiapan permukaan terlebih dahulu sebelum pengujian dilakukan untuk mendapatkan kondisi kontak yang diinginkan.

Batang kantilever gaya dipasang pada lengan gaya yang ditumpu oleh dua buah bantalan

sehingga dapat bergerak bebas dalam arah gaya normal, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Selanjutnya, beban normal dapat dikenakan dengan menggunakan lengan gaya tambahan yang dipasang di atas batang kantilever dan massa  $m$  yang dipasang pada jarak tertentu. Massa tersebut akan memberikan gaya sebesar  $F_N$  pada titik kontak antara pin dan disk. Gaya normal  $F_N$  dapat divariasikan dengan mengubah besar massa  $m$  dan jarak  $l$ .



Gambar 5. Skema diagram batang kantilever dan pemberian gaya normal pada tribometer



Gambar 6. Skema diagram batang kantilever gaya-gaya yang bekerja

Untuk mendapatkan gaya gesekan,  $F_{fric}$ , dua buah strain gage dipasang pada kantilever (Gambar 6). Disebabkan gerakan bolak-balik, gaya gesekan akan memiliki tanda yang berbeda, yaitu positif dan negatif, yang menunjukkan arah gerakan yang terjadi. Untuk mengukur gaya yang terjadi, dilakukan kalibrasi terlebih dahulu terhadap batang kantilever. Strain gage dihubungkan dengan sistem data akuisisi Kyowa DCS100A – EDX 10A/B.

Kalibrasi dilakukan dengan menggunakan beban statik dalam arah x (Gambar 6) untuk mengetahui hubungan antara besaran strain yang dibaca oleh sistem,  $\mu\text{m/m}$ , dengan gaya statik yang dipasang. Hubungan besaran strain dan gaya statik yang diperoleh diberikan pada Gambar 7, dengan hubungan:

$$\text{Strain } (\mu\text{m/m}) = 3.365 (N_{\text{statik}}) + 0.3411 \quad (1)$$

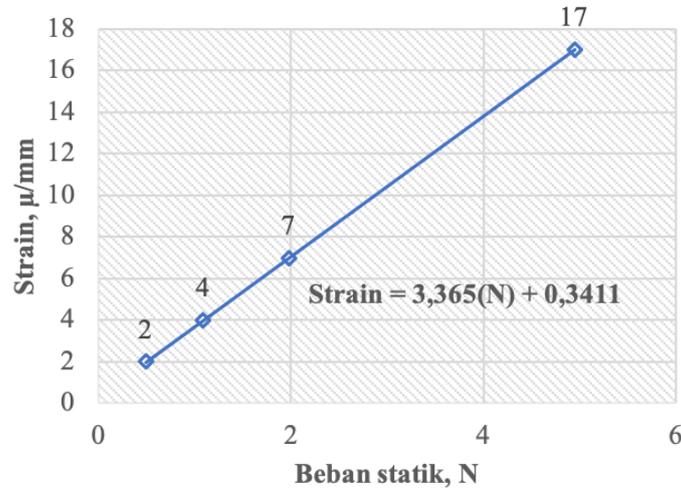
Persamaan (1) selanjutnya dapat digunakan untuk menentukan besar gaya gesekan yang terjadi pada saat pengujian dilakukan, yaitu dengan menggantikan besaran nilai  $N_{\text{statik}}$  dengan Gaya Gesekan,  $F_{fric}$ , yaitu:

$$F_{fric} = 0.30 (\text{strain}) - 0.101 \quad (2)$$

Koefisien gesekan,  $\mu$ , selanjutnya dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan:

$$F_{fric} = \mu F_N \quad (3)$$

dimana  $F_N$  adalah gaya normal yang digunakan pada pengujian gesekan.



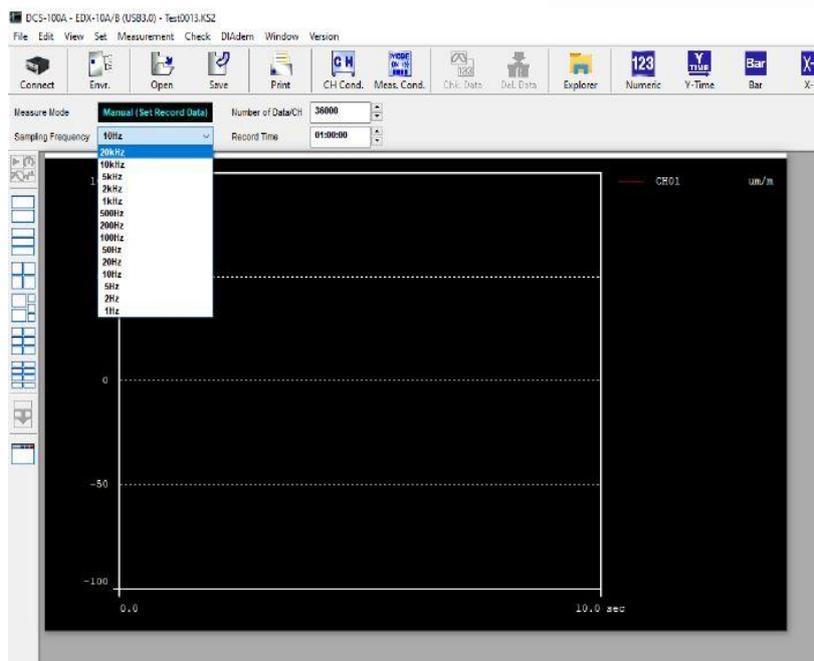
Gambar 7. Hubungan besaran strain yang terbaca dengan beban statik yang digunakan

### 3. Parameter akuisisi data

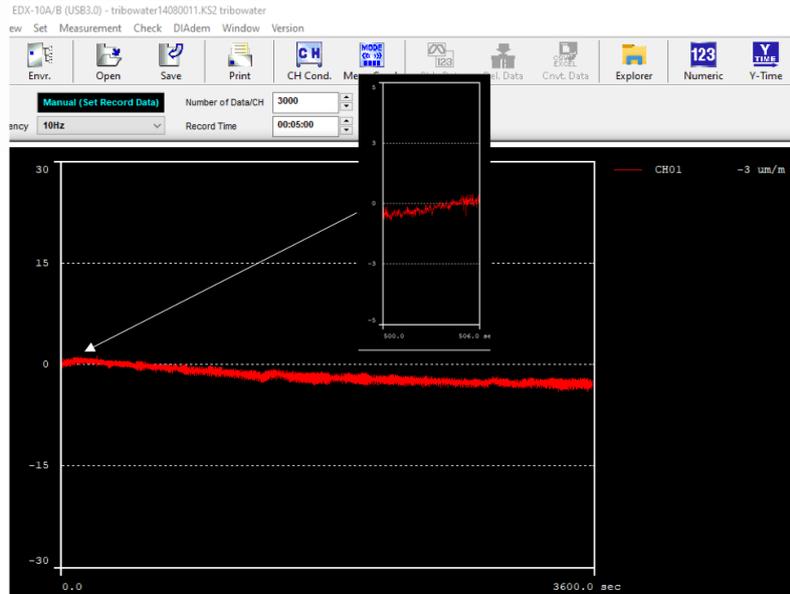
Tribometer ini menggunakan sistem akuisisi data Kyowa DCS100A dengan perangkat EDX10A/B yang memiliki 4 buah channel data. Tampilan sistem akuisisi ditunjukkan pada Gambar 8. Sistem ini dapat merekam sinyal dalam satuan volt, ampere, ataupun strain,  $\mu m/m$  dengan frekuensi perekaman data 1 Hz sampai dengan 20 kHz dan dilengkapi dengan low pass dan high pass filter. Data yang direkam dapat dikonversikan ke dalam berbagai format seperti

\*.txt ataupun \*.xlsx untuk diproses selanjutnya menggunakan software lainnya.

Tribometer ini juga memungkinkan untuk dipasang alat pemanas eksternal untuk pengujian pada suhu yang bervariasi. Alat pemanas yang digunakan dapat berupa filamen panas eksternal ataupun hembusan udara panas menggunakan alat *heat gun*. Dalam hal ini, pengukuran suhu operasi dapat dilakukan secara terpisah, ataupun dapat diintegrasikan ke dalam sistem data akuisisi melalui kabel interface Kyowa EDX10A.



Gambar 8. Tampilan layar sistem akuisisi data Kyowa DCS100

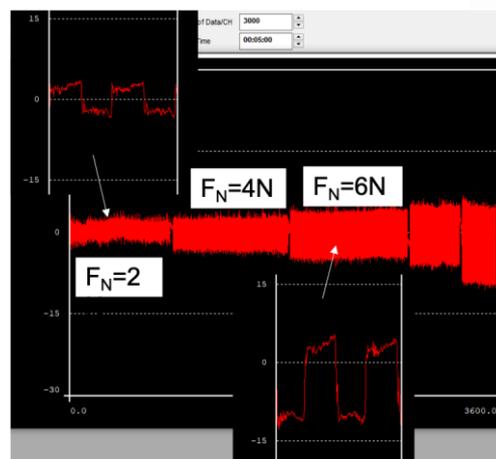


Gambar 9. Tampilan layar yang menunjukkan fluktuasi nilai strain.

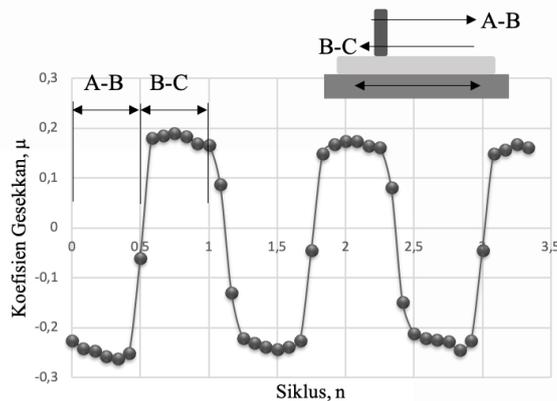
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 9 menunjukkan nilai strain yang diperoleh oleh sistem akuisisi data pada kondisi tanpa pengujian. Data direkam selama 3000 detik dengan frekuensi sampling 10 Hz atau 10 data perdetik. Dari data tersebut terlihat bahwa sistem tersebut memiliki sensitivitas yang baik dengan fluktuasi kurang dari  $1 \mu\text{m/m}$ .

Gambar 10 menunjukkan nilai strain yang diperoleh oleh sistem akuisisi data pada kondisi pengujian dengan menggunakan gaya normal yang berbeda. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa nilai strain yang diperoleh semakin bertambah besar seiring dengan semakin tingginya gaya normal yang diberikan. Pada gambar tersebut juga terlihat bahwa nilai strain berada pada posisi nilai positif dan negatif secara bergantian, yang menunjukkan arah gerakan translasi bolak balik.



Gambar 10. Data hasil uji gesekan yang menunjukkan bacaan strain untuk nilai gaya normal  $F_N$  yang berbeda. Terlihat bahwa nilai strain yang diperoleh semakin tinggi mengikuti besaran gaya normal.



Gambar 11. Data hasil uji gesekan yang telah diubah menjadi hubungan antara koefisien gesekan dan siklus bolak balik. Setiap siklus memiliki nilai gesekan positif dan negatif yang menunjukkan arah gesekan yang berlawanan.

Gambar 11 menunjukkan grafik hubungan antara koefisien gesekan,  $\mu$ , dan siklus gesekan. Data pada grafik Gambar 11 diperoleh dengan sampling frekuensi 10 Hz. Pada data tersebut, satu siklus ditempuh dalam waktu 1.3 s dengan jumlah datum sebesar 13 titik. Satu siklus penuh ditunjukkan dengan gerakan A-B-C, dimana setengah siklus adalah gerakan A-B dan B-C. Disebabkan gerakan bolak balik, sistem data akuisisi membaca data gerakan yang berlawanan dengan tanda yang berbeda, salah satunya positif dan yang lainnya negatif. Disini, nilai koefisien gesekan pada setiap titik datum diperoleh dengan menggunakan nilai bacaan strain bersama dengan Persamaan (2) dan Persamaan (3).

Dalam proses pengolahan data, terdapat kemungkinan bergesernya rekod data terhadap titik nol. Dalam hal yang demikian, data yang direkam terlebih dahulu memerlukan proses normalisasi, yang dapat dilakukan dengan bantuan software lainnya seperti Matlab, MsExcel, dan sebagainya.

Dalam suatu pengujian gesekan, waktu uji dapat diperpanjang tergantung pada jumlah frekuensi sampling. Namun demikian, tidak dianjurkan untuk melakukan pengujian dalam waktu yang relatif lama disebabkan jumlah pelumas yang dapat diberikan pada permukaan kontak jumlahnya relatif sedikit, yaitu hanya beberapa cc saja. Oleh karena itu, tribometer ini sangat cocok digunakan dalam pengujian yang bersifat pendahuluan/preliminary, ataupun sebagai perangkat alat bantu praktikum dan riset dasar bidang ilmu tribologi di universitas.

Alat uji tribometer ini telah juga digunakan untuk melakukan berbagai penelitian khususnya tentang riset dasar material pelumas terbaru

atau ramah lingkungan. Diantara penelitian yang telah dilakukan adalah material pelumas yang mengandung partikel selulosa [8], material pelumas berbasis minyak sawit yang mengandung partikel nano-karbon [9], material pelumas berbasis air dengan aditif partikel Gambir [10], dan pelumas berbasis air dengan aditif partikel nano Mxene.

## KESIMPULAN

Sebuah rancangan tribometer jenis pin-on-disk dengan gerakan bolak balik telah diajukan pada makalah ini. Tribometer memiliki konstruksi yang sederhana dan dapat digunakan untuk memperoleh nilai koefisien gesekan dari kontak permukaan spesimen berbentuk pin dan disk dengan atau tanpa pelumasan. Meskipun konstruksinya yang sederhana, beberapa penelitian telah dilakukan dengan menggunakan alat ini dan hasilnya telah dipublikasikan pada beberapa jurnal internasional bereputasi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Sdr. Shahibul Mighvar, S.T. dan Sdr Zulham, S.T. atas kontribusinya dalam perancangan dan fabrikasi perangkat tribometer ini. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada LPPM Universitas Syiah Kuala atas dana penelitian dalam bidang pelumas terbaru, melalui hibah Penelitian Profesor tahun 2023 dengan sumber dana PNBPUK.

Penulis juga berterimakasih kepada pihak lain yang telah membantu dalam penelitian yang dipublikasikan dalam jurnal ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. P. JOST and J. SCHOFIELD, "ENERGY SAVING THROUGH TRIBOLOGY: A TECHNO-ECONOMIC STUDY.," *PET REV*, vol. V 36, no. N 428, 1982.
- [2] Z. Fuadi *et al.*, "Effect of Graphene Nanoplatelets on Tribological Properties of Bacterial Cellulose/Polyolester Oil Bio-Lubricant," *Front. Mech. Eng.*, vol. 8, no. March, pp. 1–11, 2022, doi: 10.3389/fmech.2022.810847.
- [3] G. Ramirez, O. L. Eryilmaz, G. Fatti, M. C. Righi, J. Wen, and A. Erdemir, "Tribochemical Conversion of Methane to Graphene and Other Carbon Nanostructures: Implications for Friction and Wear," *ACS Appl. Nano Mater.*, pp. 6–11, 2020, doi: 10.1021/acsanm.0c01527.
- [4] J. Sun and S. Du, "Application of graphene derivatives and their nanocomposites in tribology and lubrication: A review," *RSC Advances*, vol. 9, no. 69, 2019, doi: 10.1039/c9ra05679c.
- [5] C. Donnet and A. Grill, "Friction control of diamond-like carbon coatings," *Surf. Coatings Technol.*, 1997, doi: 10.1016/S0257-8972(97)00275-2.
- [6] N. Marjanovic, B. Tadic, B. Ivkovic, and S. Mitrovic, "Design of modern concept tribometer with circular and reciprocating movement," *Tribol. Ind.*, vol. 28, no. 3–4, 2006.
- [7] A. Setiawan, J. Jamari, M. Effendy, and D. Ardiansyah, "Rancang Bangun Alat Uji Keausan Berbasis Sistem Kontak Disc-on-Disc," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 7, no. 1, pp. 17–24, 2018, doi: 10.24127/trb.v7i1.636.
- [8] 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.
- [9] Z. Fuadi, R. Kurniawan, and F. Mulana, "Tribo-layer Properties on AISI52100 Lubricated by Palm Methyl Ester Containing Graphene Nanosheet," *Tribol. Ind.*, vol. 45, no. 1, 2023, doi: 10.24874/ti.1372.09.22.03.
- [10] D. Rahmadiawan *et al.*, "Tribological Properties of Aqueous Carboxymethyl Cellulose/Uncaria Gambir Extract as Novel Anti-Corrosion Water-Based Lubricant," *Tribol. Ind.*, vol. 44, no. 4, 2022, doi: 10.24874/ti.1357.08.22.10.