

Pengembangan Produk Deteksi Lab-On-Chip untuk Analisis Tingkat Pengotoran Pelumas

Mohammad Ilham Aziz^{a1}, Yudan Whulanza^a, Ridho Irwansyah^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Depok, 16424

¹mohammadilhamaziz@ui.ac.id

ABSTRACT

The number of particles in the lubricant is a significant factor causing component wear, emphasizing the importance of continuously monitoring the lubricant condition to measure the wear particle content. Thus, effective maintenance strategies can be implemented to improve component reliability and service life before damage due to defects occurs. This study designs a measuring instrument with ease of use as the main priority, providing results quickly. Applying the spectrometry principle, this instrument measures the concentration of wear particles in the lubricant and collaborates with the latest microfluidic technology, namely Lab-on-Chip, for efficient sample pre-treatment with minimal sample consumption and a high level of integration. Thus, this study provides an essential innovation in machine maintenance that will support operational efficiency and reduce the impact of unwanted component damage. This study will analyze the effectiveness of measuring wear particles from differences in light intensity and microfluidic media. This will be reviewed using an experimental method, conducted by conducting sample tests on several lubricant samples mixed with aluminum and copper powder impurities. Aluminum powder impurities can be suspended longer than copper powder impurities. With analysis using the Pearson method, the correlation between the mass fraction of aluminum in the cuvette media and the lab-on-chip has a correlation coefficient (r) = 0.931 and a 95% CI between 0.858 and 0.967. Furthermore, the correlation between the mass fraction of copper in the cuvette media and the lab-on-chip has a correlation coefficient (r) = 0.928 and a 95% CI between 0.854 and 0.966.

Keywords: maintenance, spectrometry, microfluidic, Lab-on-Chip

Received 2 September 2024; **Presented** 2 Oktober 2024; **Publication** 20 Januari 2025

DOI: 10.71452/590753

PENDAHULUAN

Perkembangan industri modern yang semakin maju dan rumit, menuntut kehandalan dan keselamatan dari sistem yang lebih tinggi. Maka merancang strategi pemeliharaan yang memuaskan yang mampu mengatasi ruang negara yang besar dan mengurangi pengaruh ketidakpastian memiliki arti praktis yang penting (Jin et al., 2023). Pemeliharaan bertujuan mempertahankan dan mengembalikan mesin atau komponen ke kondisi yang optimal sehingga dapat terus melakukan produksi dengan optimal. Beberapa strategi pemeliharaan digunakan sesuai dengan kebutuhan seperti breakdown maintenance, preventive maintenance dan corrective maintenance. Kegiatan pemeliharaan meliputi pemeriksaan (checking), meminyaki (lubricating), perbaikan (repairing) dan pergantian suku cadang (Yudan, 2023).

Gesekan antara bagian yang bergerak adalah salah satu penyebab utama kegagalan mesin atau komponen mekanis seperti keausan dan kontaminasi partikel keausan (Z. Liu et al., 2021). Keausan umum terjadi pada komponen bergerak pada mesin karena gesekan. Pelumas digunakan untuk mengurangi dan menghindari kontak langsung pada bagian bergerak. Pelumas yang terkontaminasi partikel keausan

menyebabkan kerusakan lapisan pelumas, yang mengakibatkan pelumasan yang tidak tepat, keausan yang tidak normal, kinerja mesin rendah, emisi tinggi, dan masa pakai mesin berkurang (Tasneem et al., 2022). Meski dengan pelumas, energi yang dihasilkan sebagian besar hilang akibat gesekan pada mesin dan transmisi, sebesar 33% energi hilang akibat gesekan dengan porsi 11,5% akibat gesekan pada mesin dan 5% akibat gesekan pada gigi transmisi (Holmberg & Erdemir, 2019). Partikel keausan dengan diameter biasanya berkisar antara 10 hingga 20 μm tidak menyebabkan kerusakan mesin. Namun partikel dengan diameter lebih dari 50 μm yang dapat menyebabkan kegagalan komponen yang signifikan bahkan kegagalan selama operasi (Li et al., 2020).

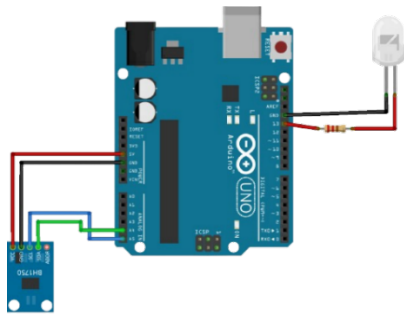
Teknologi microfluidic telah berkembang pesat dan memiliki keunggulan seperti ukuran yang kecil, konsumsi reagen yang rendah, dan kontrol aliran yang baik (He et al., 2024). Teknologi ini digunakan untuk memproses cairan melalui saluran mikro, yang dikenal sebagai Lab-on-Chip (LOC). LOC adalah laboratorium miniatur yang memproses reaksi kimia pada sebuah chip, digunakan pada penelitian skala laboratorium untuk keperluan analisis partikel (Yudan et al., 2023). Meminiaturkan teknologi LOC bertujuan untuk mencapai pre-treatment sampel yang efisien

dengan konsumsi sampel yang lebih sedikit dan integrasi yang tinggi (Chen et al., 2022).

Melalui penelitian ini diharapkan dapat membuka jalan baru dalam pengembangan microfluidic pada bidang pemeliharaan. Dengan memahami performa dari sensor dan microfluidic saat dilakukan pengukuran.

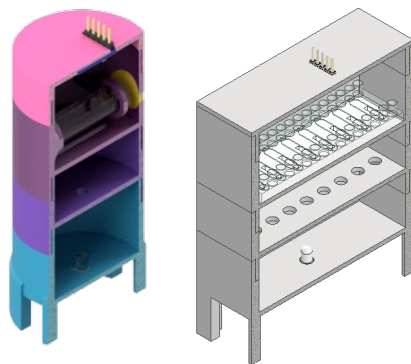
METODOLOGI

Pada persiapan eksperimen dilakukan dengan membuat terlebih dahulu skematik diagram untuk sistem elektrik menggunakan perangkat lunak fritzing. Sehingga didapatkan gambaran sistem elektrik yang akan digunakan. Dengan arduino sebagai microcontroller, selanjutnya dihubungkan pada sensor cahaya BH-1750 dan LED 3 V.



Gambar 1. Rangkaian skematik

Selanjutnya perancangan desain produk untuk pengambilan data pelumas menggunakan media cuvette dan lab-on-chip menggunakan Autodesk Inventor.



Gambar 2. Desain produk pengambilan data cuvette (kiri) lab-on-chip (kanan)

Dengan menggunakan timbangan digital untuk mengukur massa partikel pengotor Aluminium (Al) dan Tembaga (Cu). Digunakan heating magnetic stirrer untuk memudahkan pencampuran antara larutan pelumas dan partikel pengotor. Perlakuan yang sama pada heating magnetic stirrer dilakukan untuk

semua sampel yaitu pada temperatur kondisi ruangan dan dengan durasi selama 3 menit. Pelumas yang digunakan memiliki spesifikasi nomor SAE 10W-30. Hal ini karena disesuaikan dengan banyaknya penggunaannya oleh masyarakat Indonesia pada kendaraan bermotor. Sehingga dipilihlah pelumas dengan merek dagang AHM Oil MPX 3.

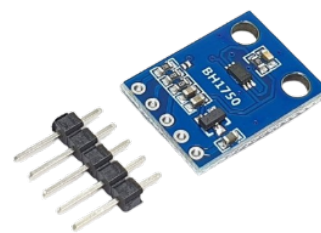
Pada tahap pengujian prototipe, digunakan 30 sampel data di dalam cuvette untuk diambil data intensitas cahaya. Dengan parameter awal sebagai berikut

Tabel 1. Parameter pengujian

Parameter	Unit
Volume larutan pada <i>cuvette</i>	2 ml
Volume larutan pada <i>lab-on-chip</i>	2 μ l
Jarak sumber cahaya dengan sampel	49 mm
Jarak sumber cahaya dengan sensor	80 mm
Durasi mixing dengan <i>magnetic stirrer</i>	3 menit

Alat Ukur

Alat ukur cahaya BH-1750 digunakan dalam penelitian ini karena kompatibel dengan Arduino. Sensor BH1750 menggunakan protokol komunikasi I²C, standar komunikasi serial dua arah dengan dua saluran untuk mengirim dan menerima data. Sensor ini berkomunikasi dengan pin SCL dan SDA, memudahkan penggunaannya dengan mikrokontroler.



Gambar 3. Sensor BH1750

Prinsip kerja sensor BH1750 melibatkan penggunaan photodiode untuk mendeteksi cahaya. Photodiode ini memiliki PN junction dan daerah deplesi, yaitu area isolasi antara daerah P (positif) dan daerah N (negatif). Daerah deplesi mencegah elektron di daerah N berpindah ke daerah P tanpa adanya bias maju (forward bias).

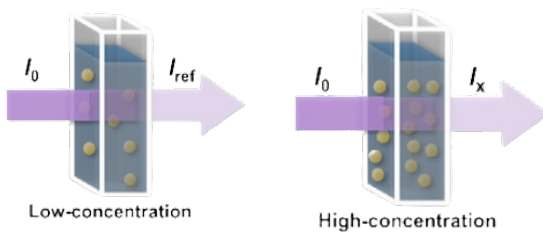
Tegangan bias mempengaruhi lebar daerah deplesi: bias maju menyempitkan daerah deplesi, memudahkan perpindahan elektron dan memungkinkan aliran arus listrik; bias mundur (reverse bias) memperlebar daerah deplesi,

menghalangi perpindahan elektron, sehingga tidak ada arus listrik yang mengalir melalui dioda.

Spectroscopy

Dalam spektrofotometri, satu hal yang dapat diukur adalah transmittance (T). Transmittance adalah rasio intensitas cahaya yang ditransmisikan (I_t) setelah berinteraksi dengan materi dibanding intensitas cahaya datang sebelum berinteraksi dengan materi (I₀). Hubungan antara T, I_t, dan I₀ ditunjukkan sebagai

$$T = \frac{I_t}{I_0} \tag{1}$$



Gambar 4. Skema pengukuran konsentrasi pada larutan

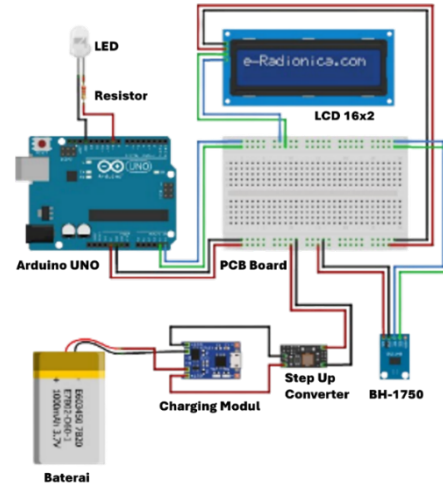
Konsentrasi Larutan

Konsentrasi larutan adalah jumlah tertentu zat terlarut yang terlarut di dalam pelarut atau larutan. Konsentrasi larutan dapat dinyatakan secara kualitatif maupun kuantitatif. Secara kualitatif, konsentrasi larutan dinyatakan sebagai larutan pekat (concentrated solution) dan larutan tak pekat (dilute solution). Konsentrasi larutan juga dapat dinyatakan dalam beberapa cara, termasuk fraksi massa, molaritas, persentase massa, parts per thousand (ppt), parts per million (ppm), maupun parts per billion (ppb). X_p adalah massa zat terlarut, sementara X_t adalah massa zat pelarut

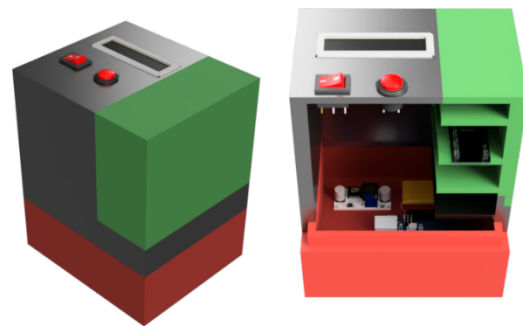
$$\text{Fraksi Massa} = \frac{X_p}{X_p + X_t} \tag{2}$$

Rancangan Produk Akhir

Perancangan produk akhir bertujuan untuk pengembangan produk berikutnya agar produk dapat menjadi lebih compact dan portabel. Perancangan produk akhir dimulai dengan membuat wiring diagram pada perangkat lunak fritzing. Selanjutnya dilanjutkan dengan desain 3D pada perangkat lunak Autodesk Fusion untuk mendapatkan gambaran akhir produk.



Gambar 5. Rangkaian skematik elektrikal



Gambar 6. Rancangan 3D produk akhir

Analytical Sensitivity

Istilah *analytical sensitivity* (atau kemampuan deteksi) merupakan metode analisis untuk mengetahui akurasi pengukuran pada konsentrasi zat yang rendah. Parameter pada analytical sensitivity seperti "Limit of the Blank (LoB)," "Limit of the Detection (LoD)" dan "Limit of the Quantification (LoQ)" yang digunakan untuk mendeskripsikan konsentrasi terendah dari suatu zat yang dapat diukur secara andal oleh prosedur analitik (Pum, 2019). Pada penelitian kali ini akan dilakukan analisis *Limit of the Detection* dan *Limit of Quantification* pada hasil keluaran sensor BH-1750.

Analisis LOD digunakan untuk menentukan konsentrasi terendah dari unsur yang dapat terdeteksi pada metode pengujian yang digunakan. Sementara analisis LOQ digunakan untuk menentukan kemampuan sensor untuk melakukan kuantifikasi pada konsentrasi terendah dari unsur. LOD dan LOQ dapat dihitung dengan

$$LOD = 3 \times \frac{\sigma}{s} \tag{3}$$

$$LOQ = 3 \times \frac{\sigma}{s} \tag{4}$$

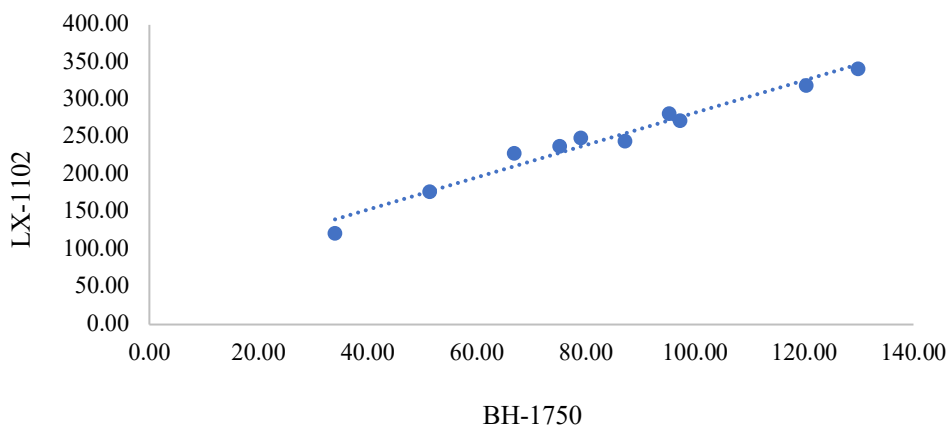
Dimana σ adalah deviasi standar dan s adalah slope dari data.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Kalibrasi Sensor

Kalibrasi sensor dilakukan untuk memastikan bahwa sensor BH-1750 sesuai dengan rancangan, fungsi dan spesifikasinya. Selain itu juga dapat membantu untuk mengetahui sifat dan meningkatkan kepercayaan dari hasil keluaran sensor. Setelah dilakukan kalibrasi dengan bantuan sensor light meter LX-1102, didapatkan hubungan linear antara sensor BH-1750 dengan sensor LX-1102 pada beberapa sampel fraksi

massa. Hubungan ini memiliki koefisien determinasi (R^2) adalah 0.9685, dengan persamaan garis lurus $y = 2,159x + 66,92$. Nilai R^2 yang berarti hampir semua variasi dalam hasil pengukuran transmittance oleh sensor BH-1750 dapat dijelaskan oleh sensor LX-1102. Persamaan menjelaskan bahwa setiap peningkatan satu unit dalam pengukuran oleh sensor LX-1102 mengakibatkan peningkatan sekitar 2,159 unit oleh sensor BH-1750. Intercept sebesar 66,92 menunjukkan nilai awal pengukuran BH-1750 saat pengukuran oleh sensor LX-1102 adalah nol. Dari persamaan yang dihasilkan akan disubstitusikan pada hasil keluaran sensor BH-1750 saat pengukuran sampel.

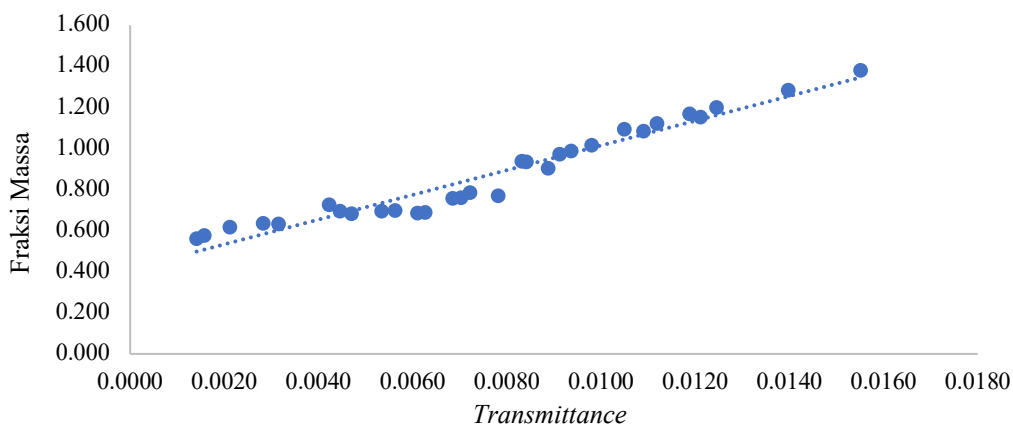


Gambar 7. Hubungan hasil keluaran sensor BH-1750 terhadap sensor LX-1102

Hasil Pengujian Data dengan Media *Cuvette*

Dilakukan pengambilan data sampel dengan bahan pengotor Aluminium (Al) dan Tembaga (Cu) sebanyak 30 sampel. Dengan parameter seperti yang

telah dipaparkan pada tabel 1, dan diolah dengan menggunakan persamaan (1), maka didapatkan hasil sebagai berikut untuk masing-masing jenis pengotor:



Gambar 8. Grafik perbandingan fraksi massa dengan *transmittance* pada sampel aluminium media *cuvette*

Hubungan antara fraksi massa dan nilai *transmittance* dapat diamati dalam bentuk grafik linear pada gambar (8). Nilai *transmittance* dihitung menggunakan persamaan (1), di mana nilai I_0 sebesar 3.360,81 untuk partikel Aluminium (Al) dan sebesar 3.358,86 untuk partikel Tembaga (Cu).

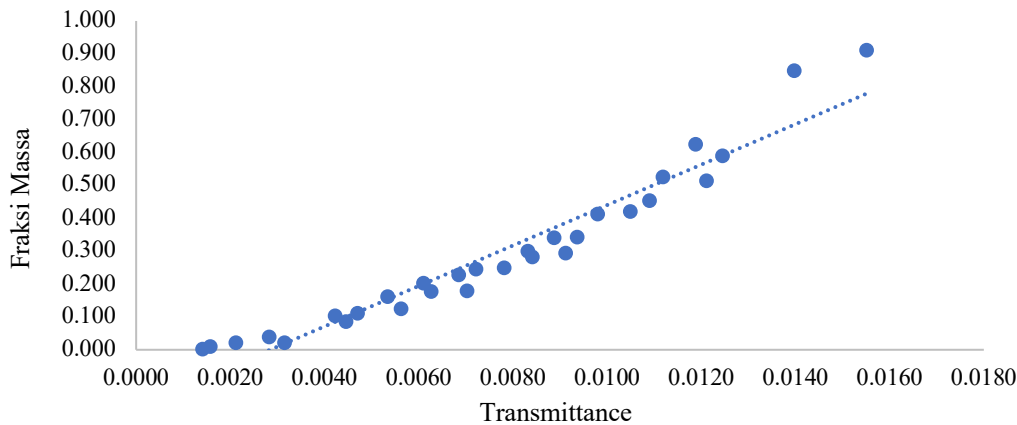
Grafik pada gambar (8) menunjukkan bahwa nilai *transmittance* berbanding lurus dengan fraksi massa. Semakin tinggi fraksi massa, maka nilai *transmittance* semakin tinggi.

Hubungan ini memiliki koefisien determinasi (R^2) adalah 0.9449, dengan persamaan garis lurus $y =$

$60,116x + 0,4131$. Artinya, setiap perubahan satuan fraksi massa menyebabkan perubahan nilai transmittance sebesar 60,116 satuan. Intersep y menunjukkan bahwa ketika fraksi massa adalah nol, nilai transmittance adalah 0,4131. Nilai R^2 menunjukkan bahwa sekitar 94,49% variasi dalam transmittance dapat dijelaskan oleh hubungan linear dengan fraksi massa.

Perlakuan yang sama dilakukan untuk partikel pengotor tembaga (Cu). Pada gambar (9) menunjukkan hubungan dengan koefisien

determinasi (R^2) sebesar 0,9319 dengan persamaan garis lurus $y = 61,509x - 0,1751$. Artinya, setiap perubahan satuan fraksi massa menyebabkan perubahan nilai transmittance sebesar 61,509 satuan. Namun pada intersep y menunjukkan bahwa ketika fraksi massa adalah nol, nilai transmittance adalah -0,1751. Yang ini menandakan bahwa model ini kurang akurat pada nilai fraksi massa yang sangat rendah. Nilai R^2 menunjukkan bahwa sekitar 93,19% variasi dalam transmittance dapat dijelaskan oleh hubungan linear dengan fraksi massa.



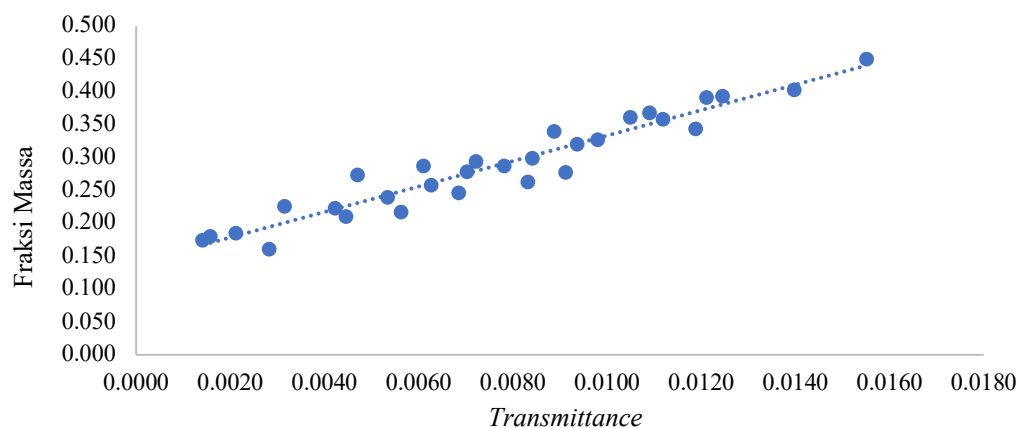
Gambar 9. Grafik perbandingan fraksi massa dengan *transmittance* pada sampel tembaga media *cuvette*

Hasil Pengujian Data dengan Media *Lab-on-Chip*

Pengambilan sampel dengan media *lab-on-chip* dilakukan dengan melalui tata cara yang sama dengan pengambilan data dengan *cuvette*. Disiapkan sebanyak 30 sampel data yang kemudian di alirkan ke dalam *lab-on-chip* berkapasitas 20 μ l menggunakan suntikan. Nilai transmittance dihitung menggunakan persamaan (1), di mana nilai I_0 sebesar 5.694,29 untuk partikel Aluminium (Al) dan sebesar 5.701,52 untuk partikel Tembaga (Cu).

Hubungan antara transmittance dengan fraksi massa Aluminium pada media *lab-on-chip* dijelaskan pada

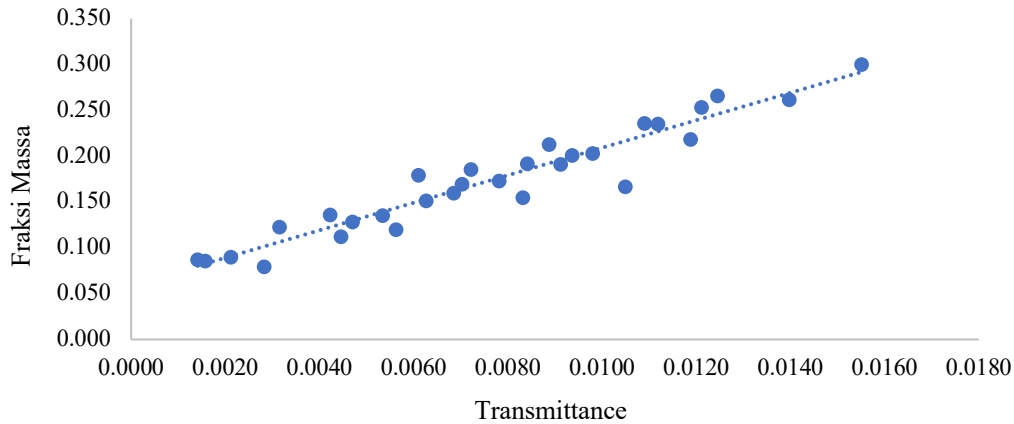
gambar (10). Keduanya memiliki hubungan dengan koefisien determinasi (R^2) adalah 0,9231, dengan persamaan garis lurus $y = 19,357x + 0,1398$. Artinya, setiap perubahan satuan fraksi massa menyebabkan perubahan nilai transmittance sebesar 19,357 satuan. Intersep y menunjukkan bahwa ketika fraksi massa adalah nol, nilai transmittance adalah 0,1398. Nilai R^2 menunjukkan bahwa sekitar 92,31% variasi dalam transmittance dapat dijelaskan oleh hubungan linear dengan fraksi massa.



Gambar 10. Grafik perbandingan fraksi massa dengan *transmittance* pada sampel aluminium media *lab-on-chip*

Perlakuan yang sama dilakukan untuk partikel pengotor tembaga (Cu), dan setelah pengolahan data, diperoleh grafik seperti pada gambar (11). Hubungan ini memiliki koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9183 dengan persamaan garis lurus $y = 15,005x - 0,0592$. Artinya, setiap perubahan satuan fraksi massa menyebabkan perubahan nilai

transmittance sebesar 15,005 satuan. Intersep y menunjukkan bahwa ketika fraksi massa adalah nol, nilai *transmittance* adalah 0,0592. Nilai R^2 menunjukkan bahwa sekitar 91,83% variasi dalam *transmittance* dapat dijelaskan oleh hubungan linear dengan fraksi massa.

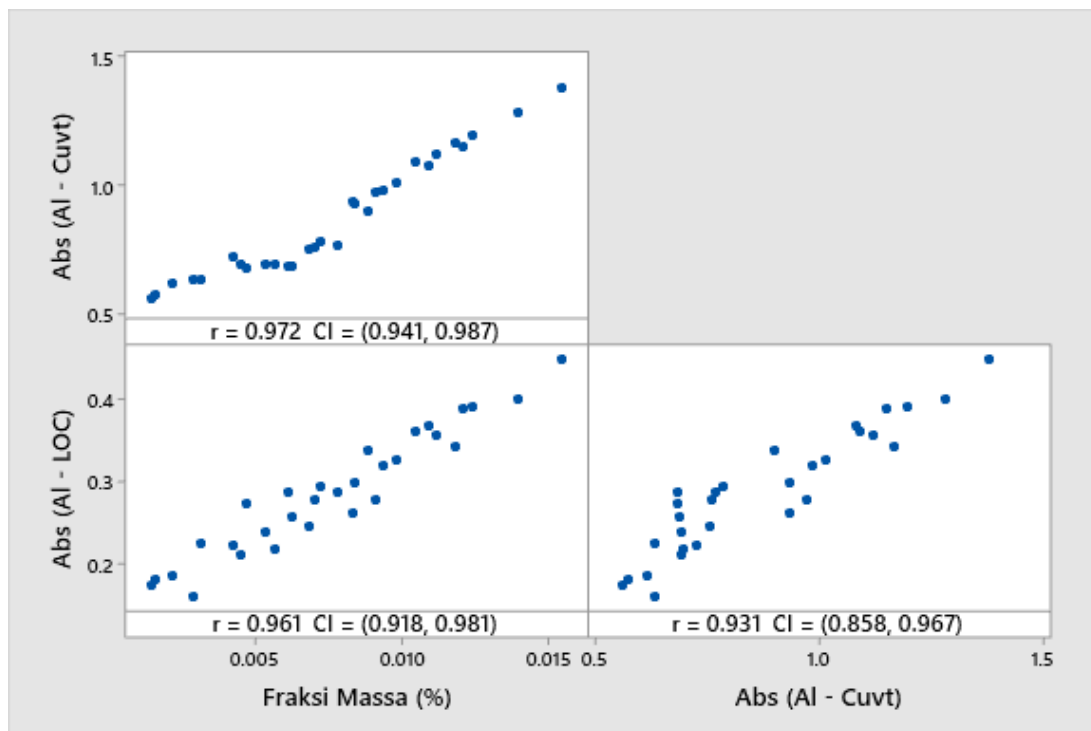


Gambar 11. Grafik perbandingan fraksi massa dengan *transmittance* pada sampel tembaga media *lab-on-chip*

Hasil Pengujian Korelasi Media *Cuvette* dengan *Lab-on-Chip*

Setelah didapatkan keseluruhan data, maka akan dibandingkan korelasi antara pengukuran

menggunakan media *cuvette* dengan *lab-on-chip*. Hal ini bertujuan untuk mengetahui kehandalan media *lab-on-chip* sebagai media pengukuran. Pengolahan data menggunakan perangkat lunak Minitab dengan metode Pearson.



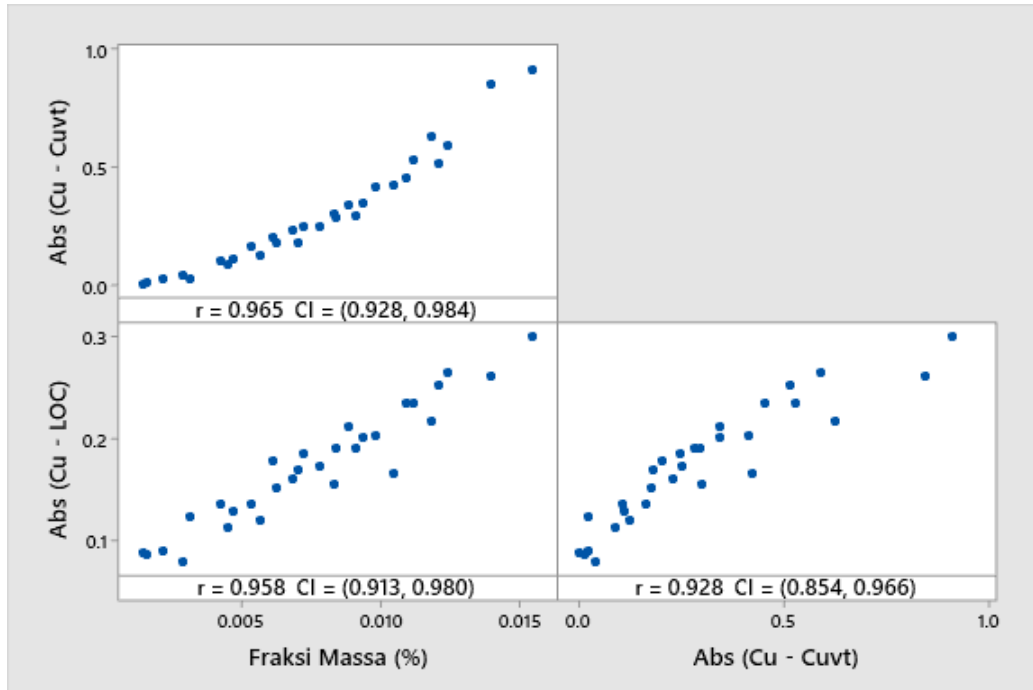
Gambar 12. Korelasi media *cuvette* dengan *lab-on-chip* pada sampel Aluminium

Hasil uji korelasi Pearson yang ditampilkan dalam gambar (12) menunjukkan hubungan linier positif yang sangat kuat antara fraksi massa dengan *absorbance* pada dua jenis media, yaitu *cuvette* dan *lab-on-chip*. Korelasi antara fraksi massa aluminium

dan media *cuvette* memiliki koefisien korelasi (r) sebesar 0.972 dengan interval kepercayaan (CI) 95% berkisar antara 0.941 hingga 0.987, menunjukkan bahwa peningkatan fraksi massa secara signifikan berhubungan dengan peningkatan *absorbance* yang

diukur. Selanjutnya, korelasi antara fraksi massa aluminium dan media *lab-on-chip* juga sangat kuat dengan $r = 0.961$ dan CI 95% antara 0.918 hingga 0.981. Korelasi antara media *cuvette* dengan *lab-on-chip* sendiri juga tinggi dengan $r = 0.931$ dan CI 95% antara 0.858 hingga 0.967. Hasil ini

mengindikasikan bahwa kedua media ini secara konsisten mendeteksi peningkatan *absorbance* seiring dengan peningkatan fraksi massa, dan menunjukkan bahwa mereka saling berkorelasi dalam pengukurannya.



Gambar 13. Korelasi media *cuvette* dengan *lab-on-chip* pada sampel Tembaga

Hasil uji korelasi Pearson yang ditampilkan dalam gambar (4-10) menunjukkan hubungan linier positif yang sangat kuat antara fraksi massa dengan *absorbance* pada dua jenis media, yaitu media *cuvette* dan media *lab-on-chip*. Korelasi antara fraksi massa tembaga dan media *cuvette* memiliki koefisien korelasi (r) sebesar 0.965 dengan interval kepercayaan (CI) 95% berkisar antara 0.928 hingga 0.984, menunjukkan bahwa peningkatan fraksi massa secara signifikan berhubungan dengan peningkatan *absorbance* yang diukur. Selain itu, korelasi antara fraksi massa tembaga dan media *lab-on-chip* juga sangat kuat dengan $r = 0.958$ dan CI 95% antara 0.913 hingga 0.980. Korelasi antara media *cuvette* dan media *lab-on-chip* sendiri juga tinggi dengan $r = 0.928$ dan CI 95% antara 0.854 hingga 0.966. Hasil ini mengindikasikan bahwa kedua alat ukur ini secara konsisten mendeteksi peningkatan *absorbance* seiring dengan peningkatan fraksi massa, dan menunjukkan bahwa mereka saling berkorelasi dalam pengukurannya.

Hasil Uji LOD dan LOQ

Hasil uji LOD menandakan nilai konsentrasi partikel terkecil dalam pelumas yang dapat dideteksi oleh BH-1750. Sementara hasil uji LOQ memberikan informasi mengenai batas terkecil untuk melakukan

kuantifikasi dengan sensor BH-1750. Sehingga pengolahan LOD dan LOQ akan melibatkan data keluaran sensor BH-1750 pada media *cuvette* dan *lab-on-chip*.

Pada media *cuvette* menghasilkan nilai LOD dan LOQ adalah 0,0113 dan 0,0376 untuk aluminium serta 0,0114 dan 0,0379 untuk tembaga. Sementara untuk Nilai LOD menunjukkan nilai fraksi massa terkecil yang dapat dideteksi oleh sensor BH-1750. Sementara nilai LOQ menunjukkan fraksi massa terkecil yang dapat dilakukan kuantifikasi oleh sensor BH-1750.

KESIMPULAN

Melalui eksperimen yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa pengukuran konsentrasi partikel dalam pelumas menggunakan media *lab-on-chip* dapat dilakukan. Eksperimen ini juga menjawab rumusan masalah dimana sensor BH-1750 memiliki kehandalan yang cukup bagus, hal ini di dukung oleh data kalibrasi sensor LX-1102 dan spectrophotometer. Hasil analisis pearson pada Minitab menunjukkan bahwa korelasi antara fraksi massa dan *absorbance* untuk sensor BH-1750 adalah 0.994, untuk sensor LX-1102 adalah 0.981, dan untuk spectrophotometer adalah 0.872. Korelasi

yang sangat kuat dan positif dengan sensor BH-1750 dan LX-1102 menunjukkan bahwa peningkatan fraksi massa konsisten dengan peningkatan absorbansi. Meski korelasi dengan spectrophotometer juga kuat dan positif, namun sedikit lebih rendah dibandingkan dua sensor lainnya, menunjukkan hubungan yang kuat tapi tidak sekuat dengan sensor BH-1750 dan LX-1102.

Media lab-on-chip dapat dijadikan sebagai alternatif dalam pengukuran konsentrasi partikel pada pelumas. Korelasi antara fraksi massa aluminium pada media cuvette dan lab-on-chip memiliki koefisien korelasi (r) = 0.931 dan CI 95% antara 0.858 hingga 0.967. Selanjutnya korelasi antara fraksi massa tembaga pada media cuvette dan lab-on-chip memiliki koefisien korelasi (r) = 0.928 dan CI 95% antara 0.854 hingga 0.966. Hasil ini menunjukkan korelasi yang kuat antara kedua media ukur.

DANA PENELITIAN

Penelitian ini telah didanai dan hibah internal penelitian Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arumugam, S., Sriram, G., & Ellappan, R. (2014). Bio-lubricant-biodiesel combination of rapeseed oil: An experimental investigation on engine oil tribology, performance, and emissions of variable compression engine. *Energy*, 72, 618–627. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.087>
- [2] Basri, E. I., Razak, I. H. A., Ab-Samat, H., & Kamaruddin, S. (2017). Preventive maintenance (PM) planning: a review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 23(2), 114–143. <https://doi.org/10.1108/jqme-04-2016-0014>
- [3] Büyüktiryaki, S., Sümbelli, Y., Keçili, R., & Hussain, C. M. (2018). Lab-On-Chip platforms for environmental analysis. In *Elsevier eBooks*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409547-2.14489-0>
- [4] Cazón, P., Cazón, D., Vázquez, M. V., & Guerra-Rodríguez, E. (2022). Rapid authentication and composition determination of cellulose films by UV-VIS-NIR spectroscopy. *Food Packaging and Shelf Life*, 31, 100791. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100791>
- [5] Chen, T., Huang, C., Wang, Y., & Wu, J. (2022). Microfluidic methods for cell separation and subsequent analysis. *Chinese Chemical Letters*, 33(3), 1180–1192. <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2021.07.067>
- [6] Cheng, W., Zhang, X., Duan, N., Jiang, L., Xu, Y., Chen, Y., Liu, Y., & Fan, P. (2022). Direct-determination of high-concentration sulfate by serial differential spectrophotometry with multiple optical pathlengths. *Science of the Total Environment*, 811, 152121. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152121>
- [7] Dkhar, D. S., Kumari, R., Malode, S. J., Shetti, N. P., & Chandra, P. (2023). Integrated lab-on-a-chip devices: Fabrication methodologies, transduction system for sensing purposes. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 223, 115120. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2022.115120>
- [8] Doyle, L. (2022, June 1). *Online, Inline, Offline, At-line: How Miniaturised Mass Spectrometry Solves Problems in All Analytical Processes - Microsaic*. Microsaic. <https://www.microsaic.com/2022/06/01/online-inline-offline-at-line-how-miniaturised-mass-spectrometry-solves-problems-in-all-analytical-processes/>
- [9] Fink, D., Blaum, K., Fedosseev, V. N., Marsh, B. A., Rossel, R. E., & Rothe, S. (2019). Determination of the first ionization energy of polonium by resonance ionization spectroscopy – Part II: Measurement of odd-parity Rydberg states at CERN-ISOLDE. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 151, 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2018.08.004>
- [10] Gauglitz, G., & Vo-Dinh, T. (2003). *Handbook of Spectroscopy*. Wiley-VCH.
- [11] González-Morales, D. F., Valencia, A., Díaz-Nuñez, A., Fuentes-Estrada, M., López-Santos, O., & García-Beltrán, O. (2020). Development of a Low-Cost UV-VIS spectrophotometer and its application for the detection of mercuric ions assisted by chemosensors. *Sensors*, 20(3), 906. <https://doi.org/10.3390/s20030906>
- [12] Grasse, E. K., Torcasio, M. H., & Smith, A. W. (2015). Teaching UV-Vis Spectroscopy with a 3D-Printable Smartphone Spectrophotometer. *Journal of Chemical Education*, 93(1), 146–151.

- <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00654>
- [13] Hamasha, M. M., Bani-Irshid, A. H., Mashaqbeh, S. A., Shwaheen, G., Qadri, L. A., Shbool, M. A., Muathen, D., Ababneh, M., Harfoush, S., Albedoor, Q., & Al-Bashir, A. (2023). Strategical selection of maintenance type under different conditions. *Scientific Reports*, *13*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42751-5>
- [14] He, X., Zhao, W., Yuan, Z., Cheng, X., He, Y., Zhang, X. H., Chang, H., Zhong, N., & Feng, H. (2024). A microfluidic evaporator with a photothermal porous layer for continuous sample concentration. *Chemical Engineering Science*, *283*, 119383. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119383>
- [15] Hollas, J. M. (2004). *Modern spectroscopy*. John Wiley & Sons.
- [16] Holmberg, K., & Erdemir, A. (2019). The impact of tribology on energy use and CO2 emission globally and in combustion engine and electric cars. *Tribology International*, *135*, 389–396. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.03.024>
- [17] Jasco. (2023, January 19). *Instrumentation of a UV-Visible Spectrophotometer - JASCO*. JASCO. <https://jascoinc.com/learning-center/theory/spectroscopy/uv-vis-spectroscopy/instrumentation/>
- [18] Jin, H., Song, X., & Xia, H. (2023). Optimal maintenance strategy for large-scale production systems under maintenance time uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety*, 109594. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109594>
- [19] Jing, C., Tang, M., & Xu, D. (2021). Integrated microfluidic chip coupled to mass spectrometry: A minireview of chip pretreatment methods and applications. *Journal of Chromatography Open*, *1*, 100021. <https://doi.org/10.1016/j.jcoa.2021.100021>
- [20] Kloziński, A., & Barczewski, M. (2019). Comparison of off-line, on-line and in-line measuring techniques used for determining the rheological characteristics of polyethylene composites with calcium carbonate. *Polimery*, *64*(02), 83–92. <https://doi.org/10.14314/polimery.2019.2.1>
- [21] Kosky, P., Balmer, R., Keat, W., & Wise, G. (2021). Industrial Engineering. In *Elsevier eBooks* (pp. 229–257).
- [22] Li, Y., Wu, J., & Guo, Q. (2020). Electromagnetic sensor for detecting wear debris in lubricating oil. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *69*(5), 2533–2541. <https://doi.org/10.1109/tim.2019.2962851>
- [23] Lima, F., Araújo, M. a. S., & Borges, L. E. P. (2003). Determination of the carcinogenic potential of lubricant base oil using near infrared spectroscopy and chemometrics. *Tribology International*, *36*(9), 691–696. [https://doi.org/10.1016/s0301-679x\(03\)00028-8](https://doi.org/10.1016/s0301-679x(03)00028-8)
- [24] Listiaji, P., & Suparta, G. B. (2020). Low-cost imaging spectrophotometer system for absorbance measurement. *Journal of Physics*, *1567*(4), 042093. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1567/4/042093>
- [25] Liu, B., Wu, S., Xie, M., & Kuo, W. (2017). A condition-based maintenance policy for degrading systems with age- and state-dependent operating cost. *European Journal of Operational Research*, *263*(3), 879–887. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.05.006>
- [26] Liu, C., Tang, X., Yu, T., Wang, T., Lu, Z., & Yu, W. (2020). Measurement of moisture content in lubricating oils of high-speed rail gearbox by Vis-NIR spectroscopy. *Optik*, *224*, 165694. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165694>
- [27] Liu, Z., Liu, Y., Zuo, H., Wang, H., & Hang, F. (2021). A lubricating oil condition monitoring system based on wear particle kinematic analysis in microfluid for intelligent aeroengine. *Micromachines*, *12*(7), 748. <https://doi.org/10.3390/mi12070748>
- [28] Madarász, L., Mészáros, L., Köte, Á., Farkas, A., & Nagy, Z. K. (2023). AI-based analysis of in-line process endoscope images for real-time particle size measurement in a continuous pharmaceutical milling process. *International Journal of Pharmaceutics*, *641*, 123060. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2023.123060>
- [29] Mao, Y., Tong, J., Chin, Z. Y., Borghesani, P., & Peng, Z. (2023). Transmission-error and vibration-based condition monitoring of gear wear with contaminated lubricant.

- Wear*, 523, 204760.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204760>
- [30] Mobley, R. K. (2002). An introduction to predictive maintenance. Elsevier.
- [31] Mołęda, M., Małysiak-Mrozek, B., Ding, W., Sunderam, V. S., & Mrozek, D. (2023). From Corrective to Predictive Maintenance—A review of maintenance approaches for the power industry. *Sensors*, 23(13), 5970.
<https://doi.org/10.3390/s23135970>
- [32] Pavia, D. L., Lampman, G. M., & Kriz, G. S. (2001). Introduction to spectroscopy: A Guide for Students of Organic Chemistry. Brooks Cole.
- [33] Pedarnig, J., Trautner, S., Grünberger, S., Giannakaris, N., Eschlböck-Fuchs, S., & Hofstadler, J. (2021). Review of element analysis of industrial materials by In-Line Laser—Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). *Applied Sciences*, 11(19), 9274.
<https://doi.org/10.3390/app11199274>
- [34] Shi, L., Li, Y., Jia, C., Shan, J., Wang, S., Liu, S., Sun, J., Zhang, D., Ji, Y., & Wang, J. (2023). An overview of fluorescent microfluidics into revealing the mystery of food safety analysis: Mechanisms and recent applications. *Trends in Food Science and Technology*, 138, 100–115.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.05.016>
- [35] Singh, A., Chauhan, P., & Mamatha, T. (2020). A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives. *Materials Today: Proceedings*, 25, 586–591.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.245>
- [36] Tasneem, H. A., Ravikumar, K., & Ramakrishna, H. V. (2022). Performance and wear debris characteristics of Karanja Biodiesel and biolubricant as a substitute in a compression ignition engine. *Fuel*, 319, 123870.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123870>
- [37] Teixeira, H. N., Da Silva Lopes, I., & Braga, A. C. (2020). Condition-based maintenance implementation: a literature review. *Procedia Manufacturing*, 51, 228–235.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.033>
- [38] Umeda, S., Tamaki, K., Sumiya, M., & Kamaji, Y. (2021). Planned Maintenance Schedule Update Method for Predictive Maintenance of Semiconductor Plasma etcher. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 34(3), 296–300.
<https://doi.org/10.1109/tsm.2021.3071487>
- [39] Viswanathan, K., Karuna, B., Kumar, P. S., Saravanan, A., & Hemavathy, R. (2022). Development of lab-on-chip biosensor for the detection of toxic heavy metals: A review. *Chemosphere*, 299, 134427.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134427>
- [40] Wakiru, J. M., Pintelon, L., Muchiri, P., & Chemweno, P. (2019). A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 118, 108–132.
<https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.08.039>
- [41] Wang, Y., Cai, B., Zhang, Y., Liu, J., Khan, J. A., Liu, Y., Li, R., Chu, Z., Liu, Z., & Liu, Y. (2022). Condition-based maintenance method for multicomponent system considering maintenance delay based on remaining useful life prediction: Subsea tree system as a case. *Ocean Engineering*, 266, 112616.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112616>
- [42] Weidner, T. J. (2023). Planned maintenance vs Unplanned maintenance and facility costs. *IOP Conference Series*, 1176(1), 012037.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1176/1/012037>
- [43] Zhang, L., Ma, W., Dong, L., Yan, X., Hu, Z., Li, Z., Zhang, Y., Wang, L., Yin, W., & Jia, S. (2011). Development of an apparatus for On-Line analysis of unburned carbon in fly ash using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). *Applied Spectroscopy*, 65(7), 790–796.
<https://doi.org/10.1366/10-06213>