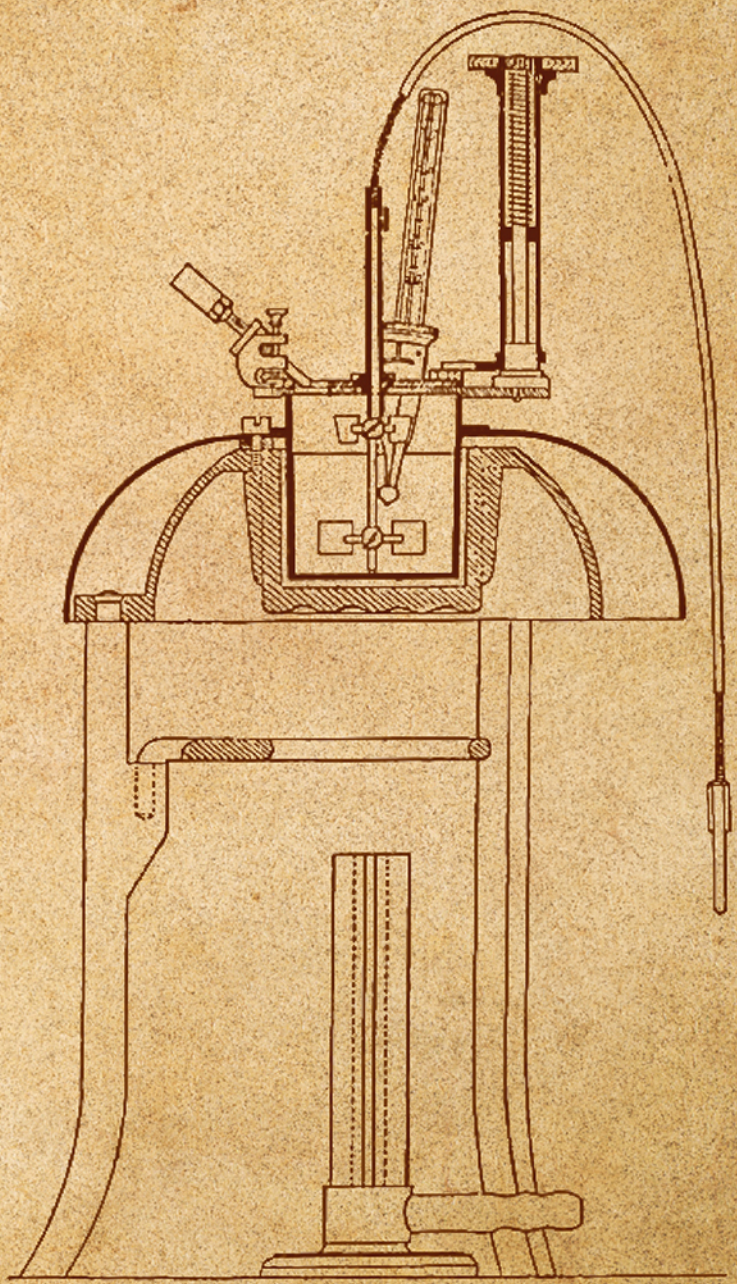
Leszek Chybowski

Metoda MORSO oceny szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem w silnikach okrętowych



Leszek Chybowski

Metoda MORSO oceny szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem w silnikach okrętowych

Pracę niniejszą dedykuję
Mojej Żonie Dorocie
– za całokształt

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki eksperymentów przeprowadzonych w związku z realizacją tematów badawczych 1/S/KPBMIM/22 i 1/S/KPBMIM/24 w Katedrze Podstaw Budowy Maszyn i Materiałoznawstwa oraz 1/S/KSO/26 w Katedrze Siłowni Okrętowych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Morskiej w Szczecinie.

Leszek Chybowski

Metoda MORSO oceny szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem w silnikach okrętowych

Wydawnictwo Naukowe Politechniki Morskiej w Szczecinie

Szczecin 2026

Leszek Chybowski
Metoda MORSO oceny szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem w silnikach okrętowych

Autor jest pracownikiem Wydziału Mechanicznego
Politechniki Morskiej w Szczecinie

Recenzenci:
prof. dr hab. inż. Adam Charchalis
prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz, dr h.c. mult.

Na okładce wykorzystano przekrój XIX w. aparatu Bertholda Pensky'ego przeznaczonego do pomiaru temperatury zapłonu cieczy w tyglu zamkniętym po jego modyfikacji w 1889 roku celem zastosowania do analizy mineralnych olejów smarowych (źródło: Holde, D. The Flashing Polnt of Mineral Lubricating Oil. Mitth. Königl. Techn. Versuchs. (1889) 64–65; J. Soc. Chem. Ind. 734, (1889)).

Opracowanie wydawnicze: *Paulina Mańkowska*
Projekt okładki: *Tomasz Kwiatkowski*
Skład komputerowy: *Irena Hajdasz*

© Copyright by Leszek Chybowski & Politechnika Morska w Szczecinie 2026

Publikacja jest dostępna na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – Użycie niekomercyjne 4.0 Międzynarodowa Polska. Treść licencji dostępna jest na stronie https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/pl/

ISBN 978-83-64434-72-3
e-ISBN 978-83-64434-73-0

Wydawnictwo Naukowe Politechniki Morskiej w Szczecinie
70-506 Szczecin, ul. T. Starzyńskiego 8, www.wydawnictwo.pm.szczecin.pl
Wydanie I. Nakład 120 egz. Format B5. 10 ark. wyd.
Druk: Volumina.pl – Daniel Krzanowski, ul. Ks. Witolda 7–9, 71-063 Szczecin

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń 9

Wykaz ważniejszych skrótów 13

Wstęp 15

1. Cel i zakres opracowania 18

2. Geneza podjęcia tematu 21

2.1. Konsekwencje rozcieńczania silnikowego oleju smarowego paliwem 21
2.2. Metody wykrywania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem 25
2.3. Zasady pobierania z silnika próbek oleju 31
2.4. Zmiana temperatury zapłonu oleju smarowego w trakcie pracy silnika 33
2.5. Metody określania temperatury zapłonu substancji palnych 35
2.6. Metoda Pensky'ego–Martensa 36

3. Metoda MORSO oceny szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem 39

3.1. Szczegółowa procedura obróbki danych 39
3.2. Uzasadnienie przyjęcia modelu liniowego w opracowanej metodzie 42
3.3. Progowe wartości parametrów oleju 47
3.4. Algorytm ogólny metody 51
3.5. Warianty realizacji układu diagnostycznego 53
3.5.1. Założenia wstępne dla układu diagnostycznego 53
3.5.2. Klasyczny model regresyjny w architekturze klient–serwer ... 54
3.5.3. Model adaptacyjny z przetwarzaniem strumieniowym 56
3.5.4. System wielosilnikowy z centralnym serwerem 56

4. Egzemplifikacja metody MORSO 60

4.1. Przedmiot i cel analizy 60
4.2. Dane badawcze 62
4.2.1. Obiekt badań 62
4.2.2. Zestawienie ogólne danych 65
4.2.3. Zestawienie danych w podziale na zastosowany w silniku olej smarowy 68

4.2.4. Zestawienie danych w podziale na producenta oleju smarowego ... 69
4.2.5. Zestawienie danych w podziale na klasę lepkościową SAE oleju smarowego ... 71
4.2.6. Zestawienie danych w podziale na model silnika okrętowego 72
4.2.7. Zestawienie danych w podziale na funkcję realizowaną przez silnik ... 73
4.2.8. Zestawienie danych w podziale na licencjodawcę silnika ... 75
4.3. Wyniki analizy ... 76
4.3.1. Informacje wprowadzające ... 76
4.3.2. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Generał Bem ... 77
4.3.3. Silnik pomocniczy nr 1 statku m/s Generał Jasiński ... 78
4.3.4. Silnik pomocniczy nr 2 statku m/s Generał Jasiński ... 79
4.3.5. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Generał Jasiński ... 80
4.3.6. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Generał Madaliński ... 81
4.3.7. Silnik główny statku m/s Goleniów ... 82
4.3.8. Silnik pomocniczy nr 2 statku m/s Kopalnia Gottwald ... 83
4.3.9. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Kopalnia Machów ... 84
4.3.10. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Mirosławiec ... 85
4.3.11. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Pomorze Zachodnie ... 86
4.3.12. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Powstaniec Styczniowy ... 87
4.3.13. Silnik pomocniczy nr 1 statku m/s Powstaniec Warszawski ... 88
4.3.14. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Studzianki ... 89
4.3.15. Silnik pomocniczy nr 1 statku m/s Syn Pułku ... 90
4.3.16. Silnik pomocniczy nr 2 statku m/s Syn Pułku ... 91
4.3.17. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Syn Pułku ... 92
4.3.18. Silnik pomocniczy nr 1 statku m/s Syn Pułku (zamiana oleju smarowego) ... 93
4.3.19. Silnik pomocniczy nr 1 statku m/s Uniwersytet Jagielloński .. 94
4.3.20. Silnik pomocniczy nr 2 statku m/s Uniwersytet Jagielloński .. 96
4.3.21. Silnik pomocniczy nr 1 statku m/s Uniwersytet Warszawski .. 97
4.3.22. Silnik pomocniczy nr 1 statku m/s Uniwersytet Wrocławski .. 98
4.3.23. Silnik pomocniczy nr 2 statku m/s Uniwersytet Wrocławski .. 99
4.3.24. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Uniwersytet Wrocławski .. 100
4.3.25. Silnik główny statku m/s Wyszków ... 101
4.3.26. Silnik główny statku m/s Zgorzelec ... 102
4.3.27. Silnik pomocniczy nr 1 statku m/s Ziemia Chełmińska ... 103
4.4. Ocena zbiorcza szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem . 104
4.4.1. Ogólne obserwacje statystyczne ... 104
4.4.2. Rozkłady prawdopodobieństwa realizacji wskaźników τ_2 oraz ν_{1000} ... 106

4.4.3. Analiza wyników badań z uwagi na model i przeznaczenie silnika ... 110
4.4.4. Analiza wyników badań z uwagi na zastosowany w silniku olej smarowy ... 112
4.4.5. Analiza wyników badań z uwagi na właściwości reologiczne oleju ... 114

5. Podsumowanie ... 119

Załączniki ... 123

Z1. Dane badawcze ... 125
Z2. Wybrane właściwości analizowanych olejów smarowych ... 126
Z3. Obliczone wartości powierzchni całkowitej płaszczy cylindrowych analizowanych silników spalinowych ... 127
Z4. Obliczone wartości wskaźnika lepkości analizowanych olejów smarowych ... 127
Z5. Klasyfikacja lepkościowa silnikowych olejów smarowych zgodnie z normą SAE J300-2021 [108] ... 128
Z6. Charakterystyka okrętowych paliw destylacyjnych zgodnie z normą ISO 8217:2024 [74] ... 130
Z7. Charakterystyka okrętowych paliw pozostałościowych zgodnie z normą ISO 8217:2024 [74] ... 132
Z8. Potwierdzenie zgłoszenia patentowego P.457342 ... 134

Spis rysunków ... 137

Spis tabel ... 142

Piśmiennictwo cytowane ... 146

Streszczenie ... 154

Abstract ... 155

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

a – wyraz wolny równania aproksymującego [°C]
$\bar{a}$ – wartość średnia wartości a dla zestawu zbiorów danych
A – powierzchnia wymiany ciepła [m^2]
A_t – całkowita powierzchnia płaszczy cylindrowych silnika [m^2]
b – współczynnik kierunkowy równania aproksymującego [°C/h]
$\bar{b}$ – wartość średnia wartości b dla zestawu zbiorów danych
BE – szerokość maksymalna statku (ang. *Breadth Extreme*) [m]
C – stopień rozcieńczenia oleju smarowego paliwem [% wag.]
C_m – średnia prędkość ślizgania [m/s]
d_1 – średnica tulei po stronie cieplejszej [m]
d_2 – średnica tulei po stronie chłodniejszej [m]
D – zanurzenie statku (ang. *Draught*) [m]
D_{cyl} – średnica cylindra analizowanego silnika [m]
$D_{K\text{-}S}$ – statystyka testu Kołmogorowa–Smirnowa
DWT – nośność statku (ang. *Deadweight Tonnage*) [t]
f – funkcja, oznaczenie ogólnie [°C]
F – siła tarcia [N]
$FP1$, $FP2$… – indeks dolny, oznaczenie kolejnego pomiaru temperatury zapłonu oleju smarowego [–]
f_{v1000} – funkcja gęstości prawdopodobieństwa rozkładu parametru v_{1000} [(% wag./1000 h)$^{-1}$]
F_{v1000} – dystrybuanta rozkładu parametru v_{1000} [–]
$f_{\tau gr}$ – funkcja gęstości prawdopodobieństwa rozkładu parametru τ_{gr} [(1000 h)$^{-1}$]
$F_{\tau gr}$ – dystrybuanta rozkładu parametru τ_{gr} [–]
GT – pojemność brutto statku (ang. *Gross Tonnage*) [–]
$KTMH$ – wysokość całkowita statku (ang. *Keel To Mast Height*) [m]
i – indeks dolny, licznik obserwacji w obrębie danego zbioru danych [–]
i_{cyl} – liczba cylindrów silnika
l – wysokość tulei cylindrowej [m]
j – indeks dolny, licznik zbiorów danych przypisanych do danego oleju smarowego [–]
LBP – długość między pionami statku (ang. *Length Between Perpendicular*) [m]

LOA – długość całkowita statku (ang. *Length Over All*) [m]
m – indeks dolny, liczba zbiorów danych przypisanych dla danego oleju smarowego [–]
n – indeks dolny, liczba obserwacji właściwości oleju w obrębie danego zbioru danych [–]
$\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ – rozkład normalny o średniej μ i wariancji σ^2
n_p – liczba obserwacji wartości wskaźnika w danym zakresie [–]
NT – pojemność netto statku (ang. *Net Tonnage*) [–]
p – poziom istotności
P – siła nacisku [N]
p_u – nacisk jednostkowy [Pa]
p_{at} – bezwzględne ciśnienie atmosferyczne [kPa]
P_e – moc znamionowa badanego silnika [kW]
Q – energia cieplna [J]
$\dot{q}$ – jednostkowy strumień ciepła tarcia [J/(s·m^2)]
$\dot{Q}$ – strumień ciepła [W]
Q_1 – pierwszy kwartyl rozkładu prawdopodobieństwa
Q_3 – trzeci kwartyl rozkładu prawdopodobieństwa
r_t – powtarzalność pomiaru temperatury zapłonu [°C]
R_t – odtwarzalność pomiaru temperatury zapłonu [°C]
R^2 – współczynnik determinacji
s – liczba próbek
S – skok tłoka analizowanego silnika [m]
S_{gr} – kryterium inicjacji zatarcia tłoka w tulei [W/m]
t – temperatura względna [°C]
T – temperatura bezwzględna [K]
t_0 – temperatura powierzchni tłoka od strony gazów (ok. 350–450 °C)
t_d – zaobserwowana temperatura zapłonu przed korektą do standardowego ciśnienia atmosferycznego [°C]
t_{FP} – temperatura zapłonu [°C]
$\overline{t_{FP}}$ – wartość średnia temperatur zapłonu określonych na koniec każdego z okresów obserwacji właściwości oleju smarowego [°C]
$t_{FP\mathrm{gr}}$ – progowa wartość temperatury zapłonu [°C]
t_{FPS} – uśredniona wartość temperatury zapłonu [°C]
t_{top} – temperatura topnienia materiału [°C]
u – niepewność pomiaru temperatury zapłonu [°C]
v – szybkość narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem [% wag./h]
v_{1000} – wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem [% wag./1000 h]
VI – wskaźnik lepkości oleju smarowego (ang. *viscosity index*) [–]
x – zmienna niezależna, oznaczenie ogólne

y – zmienna zależna, oznaczenie ogólne
λ – współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)]
μ – parametr położenia rozkładu logarytmiczno-normalnego, wartość oczekiwana (średnia) zmiennej
μ_F – współczynnik tarcia ślizgowego [–]
v – lepkość kinematyczna oleju [mm^2/s]
v_{40} – lepkość kinematyczna badanego oleju w temperaturze 40 °C [mm^2/s]
v_{100} – lepkość kinematyczna badanego oleju w temperaturze 100 °C [mm^2/s]
v_L – lepkość kinematyczna w temperaturze 40 °C oleju wzorcowego o $VI = 0$, mającego w temperaturze 100 °C taką samą lepkość kinematyczną jak badany olej [mm^2/s]
v_H – lepkość kinematyczna w temperaturze 40 °C oleju wzorcowego o $VI = 100$, mającego w temperaturze 100 °C taką samą lepkość kinematyczną jak badany olej [mm^2/s]
σ – parametr rozproszenia rozkładu logarytmiczno-normalnego, odchylenie standardowe zmiennej
σ^2 – wariancja zmiennej
τ – czas eksploatacji silnika, czas użytkowania oleju [h lub 1000 h]
$\bar{\tau}$ – wartość średnia długości okresów obserwacji właściwości oleju smarowego [h]
τ_0 – chwila referencyjna (punkt odniesienia) na osi czasu
τ_2 – czas użytkowania oleju do momentu uzyskania progowego poziomu rozcieńczenia oleju smarowego paliwem uznanego za wartość ostrzegawczą $C = 2\%$ wag. [h lub 1000 h]
τ_4 – czas użytkowania oleju do momentu uzyskania progowego poziomu rozcieńczenia oleju smarowego paliwem uznanego za wartość alarmową $C = 4\%$ wag. [h lub 1000h]
τ_A – czas użytkowania oleju do momentu uszkodzenia silnika
τ_{gr} – czas użytkowania oleju do momentu przekroczenia wartości progowej stopnia rozcieńczenia oleju smarowego paliwem [h lub 1000 h]
Ω_{FP} – zestaw danych w postaci par danych typu czas pracy oleju i temperatura zapłonu oleju

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW

ASTM – mająca siedzibę w USA międzynarodowa organizacja normalizacyjna (ang. *ASTM International*, *American Society for Testing and Materials*)
CEC – Europejska Rada Koordynująca ds. Rozwoju Metod Testowych Paliw, Środków Smarowych i Innych Płynów (ang. *Coordinating European Council for the Development of Performance Tests for Transportation Fuels, Lubricants and Other Fluids*)
CIMAC – Międzynarodowa Rada ds. Silników Spalinowych (fr. Conseil International des Machines à Combustion)
DPF – filtr cząstek stałych w spalinach z silnika o zapłonie samoczynnym (ang. *diesel particulate filter*)
ESR – spektroskopia elektronowego rezonansu spinowego (ang. *electron spin resonance spectroscopy*)
FAME – estry metylowe kwasów tłuszczowych (ang. *fatty acid methyl esters*)
FDM – miernik rozcieńczenia oleju smarowego paliwem (ang. *fuel dilution meter*)
FID – detektor płomieniowo-jonizacyjny (ang. *flame ionization detector*)
FTIR – spektrometria w podczerwieni z transformacją Fouriera (ang. *FTIR spectrometry*, *Fourier-transform infrared spectrometry*)
GC-MS – chromatografia gazowa sprzężona ze spektrometrią mas (ang. *gas chromatography–mass spectrometry*)
HFO – ciężki olej napędowy (ang. *heavy fuel oil*)
HVO – hydrorafinowane oleje roślinne i tłuszcze odpadowe (ang. *hydrotreated vegetable oil*)
IMO – Międzynarodowa Organizacja Morska (ang. *International Maritime Organization*)
IEC – Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna (ang. *International Electrotechnical Commission*)
ISO – Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (ang. *International Organization for Standardization*)
JPI – Japoński Instytut Nafty (ang. *The Japan Petroleum Institute*)
K-S – nieparametryczny test zgodności Kołmogorowa–Smirnowa

MGO – olej napędowy lekki (ang. *marine gas oil*)
MDO – olej napędowy średni (ang. *marine diesel oil*)
MORSO – Metoda Oceny szybkości Rozcieńczania oleju Smarowego Olejem napędowym
NMR – spektroskopia magnetycznego rezonansu jądrowego (ang. *nuclear magnetic resonance spectroscopy*)
PMS – system planowanego utrzymania ruchu (ang. *planned maintenance system*)
RFD – opracowana przez firmę ExxonMobil metoda wykrywania rozcieńczenia olejów smarowych paliwem pozostałościowym (ang. *residual fuel detection*)
SAE – amerykańskie międzynarodowe stowarzyszenie inżynierów samochodowych (ang. *SAE International*, *Society of Automotive Engineers*)
SAE 30 SAE 40 – klasy lepkości olejów smarowych według lepkościowej klasyfikacji SAE J300
SAW – wykrywanie akustycznych fal powierzchniowych (ang. *SAW sensing*, *surface acoustic wave sensing*)
ULSF – paliwo żeglugowe o ultra niskiej zawartości siarki $\leq 0{,}1\%$ wag. (ang. *ultra low sulphur fuel oil*)
UV – promieniowanie ultrafioletowe (ang. *ultraviolet*)
VLSF – paliwo żeglugowe o bardzo niskiej zawartości siarki $\leq 0{,}5\%$ wag. (ang. *very low sulphur fuel oil*)

Nawet najdłuższa podróż zaczyna się od pierwszego kroku
Lao-Tze (VI w. p.n.e. – V w. p.n.e.)

Sekret sukcesu polega na tym, by zacząć. Sekret zaczynania tkwi w tym, by podzielić swoje skomplikowane i wielkie zadania na małe, łatwe do wykonania zadania, a potem zacząć od pierwszego z nich.
Mark Twain (30.11.1835 – 21.4.1910)

WSTĘP

Tematyka rozcieńczania oleju silnikowego paliwem stanowi istotny problem eksploatacyjny współczesnych silników spalinowych, szczególnie w warunkach intensywnej eksploatacji oraz rosnących wymagań dotyczących trwałości i niezawodności jednostek napędowych.

Oleje silnikowe w trakcie eksploatacji silnika ulegają procesom starzenia oraz stopniowemu zanieczyszczaniu produktami spalania, produktami zużycia elementów par tribologicznych, a także płynami eksploatacyjnymi, takimi jak woda czy paliwo. Szczególnie istotnym problemem jest przedostawanie się paliwa do oleju silnikowego, co może wynikać z uszkodzeń układu wtryskowego, nieprawidłowego działania instalacji odprowadzania przecieków paliwa, a także zużycia elementów takich jak tłoki, tuleje cylindrowe i pierścienie tłokowe.

Wraz ze wzrostem stopnia rozcieńczenia oleju smarowego paliwem dochodzi do pogorszenia jego właściwości eksploatacyjnych, co bezpośrednio zwiększa ryzyko uszkodzenia silnika. Zjawisko to wiąże się przede wszystkim ze spadkiem lepkości oleju, pogorszeniem warunków smarowania (obniżeniem smarności) oraz zmniejszeniem temperatury zapłonu.

Niekontrolowany wzrost zawartości paliwa w oleju prowadzi do degradacji jego właściwości smarowych, co może skutkować przyspieszonym zużyciem elementów silnika, a w skrajnych przypadkach jego poważną awarią. Z tego względu opracowanie metody umożliwiającej ocenę stopnia rozcieńczenia oleju oraz prognozowanie czasu osiągnięcia krytycznych wartości parametrów eksploatacyjnych ma istotne znaczenie praktyczne.

Z jednej strony metoda ta umożliwia bardziej świadome podejmowanie decyzji dotyczących terminu wymiany oleju, z drugiej zaś przyczynia się do zwiększenia bezpieczeństwa eksploatacji silników oraz ograniczenia kosztów ich utrzymania.

W związku z powyższym uzasadnione staje się opracowanie metod umożliwiających ilościową ocenę szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem w warunkach rzeczywistej eksploatacji silnika.

Taka metoda umożliwia nie tylko bieżące monitorowanie intensywności tego niekorzystnego zjawiska, ale również wyznaczenie zasobu czasu eksploatacyjnego, rozumianego jako okres użytkowania silnika od momentu rozpoczęcia procesu rozcieńczania do chwili osiągnięcia przez olej smarowy wartości progowej stopnia rozcieńczenia paliwem, odpowiadającej stanowi ostrzegawczemu lub alarmowemu. Określenie tych progów umożliwi precyzyjne planowanie obsług technicznych, ograniczenie ryzyka uszkodzeń układu smarowania oraz zwiększenie niezawodności pracy silnika w całym okresie jego eksploatacji.

Niniejsze opracowanie prezentuje nową metodę oceny szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem nazwaną przez autora MORSO (akronim: **m**etoda **o**ceny szybkości **r**ozcieńczania oleju **s**marowego **o**lejem napędowym) w oparciu o wyniki okresowych pomiarów temperatury zapłonu oleju pobranego z instalacji smarowania obiegowego silnika spalinowego.

Metoda MORSO została zaprezentowana z wykorzystaniem danych eksploatacyjnych pochodzących z silników bezwodzikowych pracujących na lekkim i średnim oleju napędowym. Zakres jej potencjalnych zastosowań jest jednak szerszy i obejmuje również silniki wodzikowe, w tym jednostki zasilane ciężkimi paliwami oraz silniki dwupaliwowe. Podstawą takiego uogólnienia jest wspólny mechanizm fizyczny towarzyszący przedostawaniu się paliwa ciekłego do układu smarowania. Niezależnie od rodzaju stosowanego paliwa jego obecność powoduje obniżenie temperatury zapłonu oleju smarowego, ponieważ paliwo charakteryzuje się znacznie niższą temperaturą zapłonu niż olej smarowy.

Monografia obejmuje więc zagadnienia związane z problematyką oceny stopnia rozcieńczenia oleju smarowego paliwem w silnikach spalinowych z wykorzystaniem temperatury zapłonu oleju jako wskaźnika reprezentującego pośrednio stopień rozcieńczenia oleju smarowego paliwem. Nowo opracowana metoda MORSO umożliwia:

- wyznaczenie szybkości procesu rozcieńczania oleju smarowego olejem napędowym w warunkach normalnej eksploatacji silników spalinowych;
- określenie szacunkowego czasu, po upływie którego analizowany olej osiąga wartość progową temperatury zapłonu, a dalsza eksploatacja silnika jest niezalecana, zaś wymiana oleju staje się konieczna.

Opracowanie przeznaczone jest dla specjalistów zajmujących się eksploatacją silników okrętowych, mechaników okrętowych i służb nadzoru technicznego armatorów statków morskich, a także naukowców i studentów chcących pogłębić wiedzę z zakresu diagnostyki silników spalinowych z wykorzystaniem zmian parametrów oleju smarowego w instalacji smarowania silnika.

Składam podziękowanie Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wsparcie finansowe badań będących przedmiotem niniejszej pracy. Bardzo dziękuję recenzentom: Profesorowi Adamowi Charchalisowi i Profesorowi Jerzemu Merkiszowi za cenne uwagi i wskazówki, które istotnie przyczyniły

się do poprawy jakości niniejszej pracy. Dziękuję także redaktorom za uwagi techniczne i edytorskie oraz pomoc w poprawie szaty graficznej pracy.

Szczególne podziękowania za motywację, inspirację i wsparcie kieruję jednak do Żony Doroty, której pracę niniejszą dedykuję.

Wyrażam przekonanie, iż monografia będzie przydatna dla eksploatatorów systemów energetycznych. Zawarty w niej przykład aplikacyjny umożliwi lepsze zidentyfikowanie procesów zachodzących w silnikach spalinowych przez studentów kierunków mechanicznych uczelni wyższych.

Życzę Państwu przyjemnej lektury i proszę o kierowanie do mnie wszelkich uwag i propozycji, które mogłyby przyczynić się do poprawy jakości tej i kolejnych publikacji.

prof. dr hab. inż. Leszek Chybowski

Prawdziwy podróżniczy akt odkrywania polega nie na szukaniu nowych lądów, ale na patrzeniu na nie nowymi oczami.
Marcel Proust (10.7.1871 – 18.11.1922)

Co innego jest słyszeć, a co innego wiedzieć na pewno.
Joseph Rudyard Kipling (30.5.1865 – 18.1.1936)

1. CEL I ZAKRES OPRACOWANIA

Celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie autorskiej, empiryczno-analitycznej metody MORSO umożliwiającej ocenę szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem w silnikach spalinowych. Metodę opracowano na podstawie badań zmian temperatury zapłonu obiegowego oleju smarowego spowodowanej jego zanieczyszczeniem paliwem zasilającym silnik.

Metoda w niniejszym opracowaniu została zaaplikowana dla zestawu danych pochodzących z silników bezwodzikowych zasilanych lekkim i średnim olejem napędowym. Niemniej jednak w analogiczny sposób można prowadzić analizę dla silników wodzikowych, w tym zasilanych ciężkimi olejami napędowymi oraz silników dwupaliwowych, gdyż obniżenie temperatury zapłonu oleju w instalacji smarowania ma miejsce przy rozcieńczeniu oleju paliwem ciekłym niezależnie od rodzaju tego wykorzystywanego w danym silniku paliwa. Wynika to z faktu, że temperatura zapłonu paliwa jest znacznie niższa niż temperatura oleju smarowego.

W literaturze tematu znaleźć można metody szacowania szybkości rozcieńczania oleju oparte na warunkach eksploatacyjnych [1], czy też szybkości parowania lekkich frakcji z oleju [2] lub rodzaju wykorzystywanego paliwa [3]. Ich zastosowanie jest jednak problematyczne ze względu na konieczność posiadania danych szczegółowych niezbędnych do aplikacji modelu oraz złożoność i niepowtarzalność warunków eksploatacji rzeczywistych silników spalinowych.

Powyższa obserwacja była podstawą do opracowania przez autora nowej metody opartej o dane eksploatacyjne, która wykorzystuje model iteracyjny (z możliwością aktualizacji przy kolejnych odświeżeniach, tj. w sytuacji uzupełnienia oleju mającego istotny wpływ na właściwości fizykochemiczne oleju lub całkowitych wymian oleju smarowego w instalacji smarowania silnika). Dla uproszczenia analizy z powodów praktycznych, okresowe (mające miejsce co kilka dni) rutynowe uzupełnienie ilości oleju w instalacji smarowania obiegowego silnika (tzw. „dolewki") o kilka do kilkunastu litrów wynikające ze zużycia oleju w silniku, nie jest uwzględniane w analizie. Oczywiście metoda może zostać rozbudowana poprzez

wprowadzenie współczynników korygujących mających na celu uwzględnienie częstotliwości uzupełnień rutynowych i ilości oleju dolewanych w trakcie tych uzupełnień.

Zaproponowana metoda może umożliwić ilościową ocenę procesu degradacji oleju smarowego oraz prognozowanie zmian jego właściwości eksploatacyjnych w funkcji czasu pracy silnika według zaproponowanego modelu statystycznego.

W pierwszej części pracy przedstawiono genezę podjęcia tematu oraz podstawowe informacje dotyczące temperatury zapłonu jako jednego z kluczowych parametrów diagnostycznych oleju silnikowego wraz z omówieniem metod wyznaczania temperatury zapłonu oraz charakterystyką wykorzystanej w pracy metody pomiarowej. Zagadnienia te stanowią podstawę do dalszych rozważań dotyczących celowości wykorzystania tego parametru w ocenie szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem.

Kolejną część stanowi szczegółowy opis zaproponowanej metody MORSO służącej do oceny szybkości rozcieńczania oleju smarowego olejem napędowym w instalacji smarowania silnika podczas eksploatacji. Opis zawiera założenia teoretyczne do analizy, uzasadnienie przyjęcia określonych modeli liniowych w metodzie, a także definicję progowych wartości parametrów eksploatacyjnych oleju.

W części tej przedstawiono również szczegółową procedurę przetwarzania danych pomiarowych oraz ogólny algorytm postępowania umożliwiający praktyczne zastosowanie opracowanej metody. W ramach tej części uwzględniono także możliwe warianty implementacyjne układu diagnostycznego, co pozwala na jego zastosowanie w różnych konfiguracjach systemów eksploatacyjnych.

Ostatnia część pracy ma charakter aplikacyjny i obejmuje egzemplifikację opracowanej metody na podstawie rzeczywistych danych eksploatacyjnych silników spalinowych stosowanych w siłowniach okrętowych. W tej części monografii scharakteryzowano sposób przygotowania i analizy danych badawczych uwzględniających zróżnicowane typy silników, rodzaje olejów smarowych oraz warunki eksploatacyjne.

Następnie zaprezentowano wyniki uzyskane dla szeregu przypadków eksploatacyjnych, obejmujących zarówno silniki pomocnicze, jak i główne jednostki napędowe statków.

Przeprowadzona analiza pozwoliła na weryfikację skuteczności opracowanego podejścia oraz ocenę jego przydatności w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Na podstawie uzyskanych wyników dokonano również oceny stabilności metody oraz jej wrażliwości na zmienność warunków pracy silników, co umożliwiło sformułowanie wniosków dotyczących możliwości jej dalszego wykorzystania w diagnostyce eksploatacyjnej.

Całość opracowania kończy podsumowanie, w którym zestawiono najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz oraz wskazano potencjalne kierunki dalszego rozwoju metody i jej zastosowań w diagnostyce eksploatacyjnej silników spalinowych.

Dodatkiem do opracowania są załączniki Z1–Z8, w których przedstawiono materiały uzupełniające oraz dane stanowiące podstawę przeprowadzonych analiz i obliczeń. Obejmują one zestawienia właściwości badanych olejów smarowych i paliw, wyniki obliczeń parametrów eksploatacyjnych, klasyfikacje normatywne oraz dane badawcze wykorzystane w części analitycznej opracowania. Takie podejście daje możliwość pełniejszego wglądu w przyjętą metodykę oraz weryfikacji uzyskanych wyników.

Badania polegają na zobaczeniu tego, co wszyscy wiedzieli,
i myśleniu o tym, o czym nikt nie pomyślał
Albert Szent-Györgyi (16.8.1893 – 22.9.1986)

Nie lekceważcie nigdy zjawisk, które wydają wam się niezwykłe.
Zdarza się, że pozory mylą i że jest to fałszywy alarm, ale może też się
zdarzyć, że będzie to odkrycie jakiejś ważnej prawdy.
Aleksander Fleming (6.8.1881 – 11.3.1955)

2. GENEZA PODJĘCIA TEMATU

2.1. Konsekwencje rozcieńczania silnikowego oleju smarowego paliwem

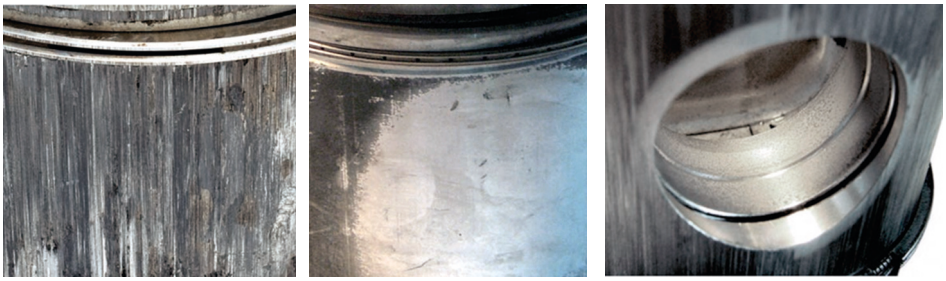
Podczas eksploatacji tłokowego silnika spalinowego, szczególnie typu bezwodzikowego, może dochodzić do przedostawania się paliwa do oleju smarowego krążącego w układzie smarowania. Zjawisko to jest najczęściej spowodowane nieprawidłowym działaniem układu paliwowego i instalacji odprowadzającej przecieki paliwa oraz oleju, a także pogarszającym się stanem technicznym pierścieni tłokowych, tłoków oraz tulei cylindrowych [4, 5].

Należy przy tym zauważyć, że pogorszenie stanu technicznego elementów grupy tłokowo-cylindrowej może jednocześnie prowadzić do zwiększenia zużycia oleju silnikowego, wynikającego ze wzrostu ilości oleju przedostającego się do komory spalania [6, 7].

Obecność paliwa w oleju prowadzi do jego rozcieńczenia, co obniża właściwości smarne i pogarsza warunki pracy współpracujących elementów tribologicznych. W konsekwencji zmniejsza się sprawność oraz niezawodność silnika, przyspiesza zużycie jego podzespołów [8, 9], a w sytuacjach skrajnych zwiększa się ryzyko wystąpienia wybuchu w skrzyni korbowej [10]. Na rysunku 2.1 przedstawiono przykładowe ślady zużycia i uszkodzenia potencjalnie związane z pracą silnika w warunkach zanieczyszczenia obiegowego oleju smarowego paliwem.

W literaturze przedmiotu można znaleźć liczne badania dotyczące oceny skuteczności oraz niezawodności pracy silników spalinowych eksploatowanych z zanieczyszczonym olejem obiegowym, w tym z olejem rozcieńczonym paliwem zarówno destylacyjnym, jak i pozostałościowym [4]. Podobnie można odnaleźć wyniki oceny szybkości zanieczyszczania oleju smarowego paliwem w trakcie eksploatacji, które w skrajnych sytuacjach mogą osiągać wartości tak wysokie, jak 1,5% wag./h [11].

Wyniki badań przedstawione w publikacjach naukowych i technicznych jednoznacznie wskazują, że obecność paliwa w oleju smarowym wywiera negatywny



(a) (b) (c)

Rys. 2.1. Przykładowe uszkodzenia i ślady zużycia elementów silników spalinowych spowodowane pogorszeniem właściwości smarnych oleju silnikowego na skutek jego rozcieńczenia paliwem [9]: (a), (b) – ślady zużycia i zarysowania części prowadzącej tłoka; (c) – pitting w piaście sworznia tłokowego (reprodukowano za zgodą firmy Mahle)

wpływ na funkcjonowanie silnika, tj. obniża sprawność jego pracy, skraca okres użytkowania oleju smarowego oraz pogarsza niezawodność i bezpieczeństwo eksploatacji jednostki napędowej [12, 13, 14]. Długotrwałe i postępujące rozcieńczanie oleju paliwem może prowadzić do intensyfikacji procesów zużyciowych, a w konsekwencji nawet do poważnych uszkodzeń silnika [15, 16, 17].

Kluczową rolę w ograniczaniu tarcia w skojarzeniach tribologicznych odgrywa film olejowy. W przypadku rozcieńczenia oleju paliwem destylacyjnym podstawowym problemem jest spadek lepkości środka smarnego, ponieważ olej napędowy charakteryzuje się znacznie niższą lepkością niż olej smarowy [18]. Zjawisko to powoduje pogorszenie właściwości smarowych oraz osłabienie wytrzymałości filmu olejowego [3], co sprzyja przyspieszonemu zużyciu tulei cylindrowych i łożysk [14, 19]. Dodatkowo w pewnych sytuacjach tworzenie tzw. gorących miejsc (ang. *hot spots*) może zwiększać ryzyko występowania przedwczesnego zapłonu w cylindrze silnika [20].

Źródła literaturowe wskazują również na szereg innych niekorzystnych skutków wynikających z obniżenia lepkości oleju lub jego ogólnej degradacji. Należą do nich między innymi zmniejszenie skuteczności działania dodatków uszlachetniających, wzrost lotności oleju oraz przyspieszenie procesów jego starzenia i utleniania [12, 21, 22, 23, 24]. Pogarszające się właściwości eksploatacyjne środka smarnego powodują konieczność częstszej wymiany oleju, co przekłada się na wzrost kosztów związanych z użytkowaniem silnika.

Znaczenie tego problemu wzrasta szczególnie w przypadku rozcieńczania olejów smarowych paliwami zawierającymi biokomponenty, takie jak estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME) [25, 26]. W takich warunkach mieszanina paliwa i oleju może cechować się nie tylko gorszymi właściwościami smarowymi [27], ale również wyraźnie obniżoną stabilnością termiczną i oksydacyjną [28, 29]. Ponadto może ona sprzyjać nasileniu procesów korozyjnych zachodzących w elementach silnika [30].

Główną przyczyną przedostawania się paliwa z komory spalania do skrzyni korbowej są przedmuchy gazów spalinowych (ang. *blow-by*). Zjawisko to jest zwykle związane z pogorszeniem stanu technicznego pierścieni tłokowych, tłoków oraz tulei cylindrowych [14], a także z nieprawidłowościami w działaniu układu wtryskowego paliwa lub instalacji odprowadzania jego przecieków [31]. Paliwo spływające po powierzchni tulei cylindrowej do skrzyni korbowej przyczynia się do intensyfikacji zużycia węzła tribologicznego tłok–pierścienie–tuleja. W skrajnych przypadkach może to doprowadzić do zatarcia tłoka, a ilość energii cieplnej wydzielonej podczas tego procesu może okazać się wystarczająca do zainicjowania eksplozji [5].

Zatarcie występujące pomiędzy współpracującymi elementami, takimi jak tłok i tuleja cylindrowa, stanowi szczególną formę zużycia awaryjnego. Najczęściej jest ono skutkiem niewystarczającego smarowania spowodowanego zanieczyszczeniem oleju, jego niedoborem lub nieodpowiednimi właściwościami smarowymi. Może być również efektem przekroczenia dopuszczalnych obciążeń wynikających z deformacji współpracujących części, bądź nadmiernych nacisków kontaktowych [32].

Gwałtowny wzrost temperatury powierzchni roboczych towarzyszy procesowi zatarcia elementów pary tribologicznej [33]. Przewodzenie ciepła to proces wymiany ciepła między ciałami o różnej temperaturze pozostającymi ze sobą w bezpośrednim kontakcie. Ciepło płynie pomiędzy dwoma elementami tylko wtedy, gdy występuje różnica temperatury tych ciał. Jednym z podstawowych mechanizmów wymiany energii cieplnej jest przewodzenie ciepła, zachodzące pomiędzy ciałami pozostającymi w bezpośrednim kontakcie. Kierunek przepływu ciepła jest zawsze od obiektu o temperaturze wyższej do obiektu o temperaturze niższej. Strumień energii przekazywany w wyniku przewodzenia opisuje równanie równania Fouriera [4]:

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} = -\lambda \oint_A \nabla T \cdot dA \tag{2.1}$$

gdzie: Q – energia cieplna [J], τ – czas [s], λ – współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)], A – powierzchnia wymiany ciepła [m^2], T – temperatura bezwzględna [K].

Dla ustalonego przepływu ciepła przez ściankę płaską, po scałkowaniu i zmianie skali temperatury na względną wyrażoną w °C, równanie (2.1) przyjmuje postać [31]:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda A}{d} \Delta t \tag{2.2}$$

gdzie: $\dot{Q}$ – strumień ciepła [W], d – grubość ścianki przewodnika ciepła [m], Δt – różnica temperatury po obu stronach przewodnika ciepła [°C].

Z kolei dla ustalonego przepływu przez ściankę cylindryczną tulei (tuleja cylindrowa lub analogicznie panewka) równanie (2.1) przyjmuje postać [34]:

$$\dot{Q} = \frac{2\pi l\lambda}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}\Delta t \tag{2.3}$$

gdzie: l – długość (wysokość) tulei [m], d_1 – średnica tulei po stronie cieplejszej [m], d_2 – średnica tulei po stronie chłodniejszej [m].

Ryzyko zatarcia współpracujących elementów danej pary tribologicznej zwiększa się ze wzrostem ilości ciepła powstającego na skutek tarcia tych elementów.

Jednostkowy strumień ciepła tarcia $\dot{q}$ (J/(s·m^2)) opisuje formuła [33]:

$$\dot{q} = C_m\, p_u\, \mu_F \tag{2.4}$$

gdzie: C_m – średnia prędkość ślizgania [m/s], p_u – nacisk jednostkowy (Pa), μ_F – współczynnik tarcia ślizgowego [–].

Szczegółowe wyprowadzenie formuły (2.4) autor przedstawił w publikacji [31].

Współczynnik tarcia określany jest jako:

$$\mu_F = \frac{F}{P} \tag{2.5}$$

gdzie: F – siła tarcia [N], P – siła nacisku [N].

Dla danej pary tribologicznej, strumień ciepła doprowadzony do powierzchni A trącej o powierzchnię B wykonaną z dowolnego materiału, zgodnie z zależnościami (2.2) i (2.3) wywoła wzdłuż tego elementu rozkład temperatury $t_A - t_B$ określony zależnością [33]:

$$t_A - t_B = \frac{\dot{q}}{\lambda} \tag{2.6}$$

Dla zatarcia współpracujących elementów na powierzchni A, powierzchnia ta musi osiągnąć temperaturę topnienia t_{top} [°C], czyli:

$$t_{\text{top}} - t_0 = \frac{\dot{q}}{\lambda} \tag{2.7}$$

gdzie: t_0 – stała temperatura powierzchni B równa dla powierzchni tłoka od strony gazów ok. 350–450 °C.

Przyjmując wartość średnią i podstawiając do zależności (2.7) równanie (2.4), otrzymano kryterium inicjacji zatarcia [33]:

$$p_u\, C_m = S_{\text{gr}} = \frac{\lambda}{\mu_F}\left(t_{\text{top}} - 400\right) \tag{2.8}$$

Wydzielające się podczas procesu zacierania elementów ciepło powoduje uplastycznienie materiału i zgrzewanie poszczególnych wierzchołków nierówności, a w konsekwencji prowadzi do sklejania się elementów, ich rozrywania i przenoszenia materiału z jednego elementu na drugi.

Obliczone na podstawie zależności (2.8) graniczne wartości współczynnika S_{gr} pokazano w tabeli 2.1.

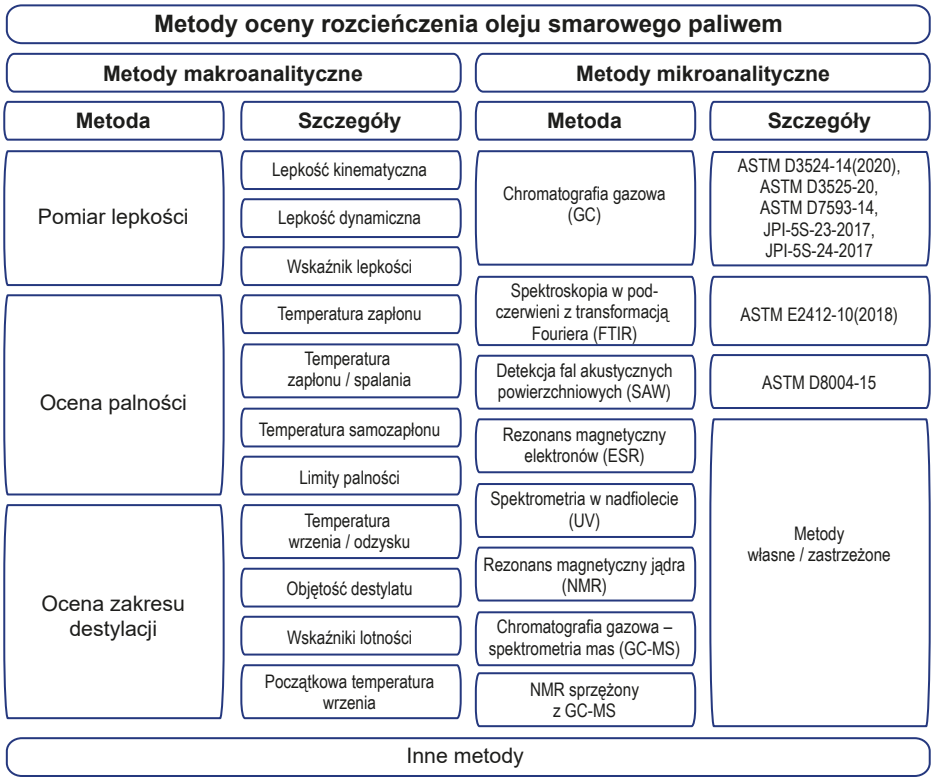
Tabela 2.1. Wartości współczynnika S_{gr} dla wybranych materiałów, z których wykonane są współpracujące ciernie elementy [35]

Para materiałów	Współczynnik dynamicznego tarcia suchego [–]	Temperatura topnienia t_{top} [°C]	Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)]	Współczynnik S_{gr} [W/m^2]
Żeliwo Żeliwo	~0,18	1200 1200	55 55	0,245 0,245
Żeliwo Stal	0,18	1200 1400	55 40	0,245 0,221
Żeliwo Chrom	0,08	1200 1920	55 92	0,550 1,755
Żeliwo Molibden	~0,10	1200 2620	55 142	0,442 3,140

Ciepło generowane podczas procesu zatarcia powoduje miejscowe uplastycznienie materiału oraz tworzenie połączeń adhezyjnych pomiędzy wierzchołkami nierówności współpracujących powierzchni. W rezultacie dochodzi do przywierania elementów do siebie, odrywania fragmentów materiału oraz jego przemieszczania pomiędzy stykającymi się częściami. A w konsekwencji do poważnego uszkodzenia silnika związanego z zatarciem tłoka w tulei cylindrowej silnika.

2.2. Metody wykrywania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem

Istnieje szereg metod wykrywania rozcieńczenia i oceny chwilowego stopnia rozcieńczenia olejów smarowych paliwem. W ogólności można je podzielić na metody makroanalityczne i mikroanalityczne. Zestawienie najważniejszych metod w podziale na te dwie grupy przedstawiono na rysunku 2.2.



Rys. 2.2. Metody wykrywania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem [36]

Najczęściej wykorzystywanymi metodami oceny chwilowego stopnia zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem są okresowe badania lepkości oraz oznaczanie temperatury zapłonu oleju. Techniki te charakteryzują się stosunkowo niskimi kosztami realizacji i są powszechnie dostępne w większości laboratoriów zajmujących się diagnostyką przemysłową.

Do najważniejszych zalet stosowania pomiaru lepkości jako wskaźnika rozcieńczenia oleju smarowego olejem napędowym należy szeroka dostępność aparatury pomiarowej, zarówno laboratoryjnej, jak i przenośnej. Z tego względu metoda ta jest powszechnie stosowana podczas rutynowych kontroli stanu olejów eksploatacyjnych. Dodatkowym atutem jest możliwość wykrywania obecności etanolu oraz paliw typu biodiesel.

Należy również podkreślić, że sama zmiana lepkości nie stanowi jednoznacznego dowodu obecności paliwa w oleju. Parametr ten może ulegać zmianom pod wpływem wielu innych czynników, między innymi [23, 37]:

- procesów starzenia oleju związanych z utlenianiem oraz rozkładem termicznym jego składników,
- zużywania się dodatków uszlachetniających w wyniku reakcji chemicznych,

- akumulacji zanieczyszczeń, takich jak produkty zużycia elementów maszyn, pozostałości spalania czy pyły obecne w otoczeniu,
- zmieszania oleju z innymi środkami smarowymi lub cieczą chłodzącą,
- skażenia mikroorganizmami, w tym bakteriami, grzybami, wirusami oraz pierwotniakami.

Z tego względu lepkość powinna być traktowana jedynie jako parametr pomocniczy przy ocenie rozcieńczenia oleju paliwem i analizowana łącznie z wynikami oznaczenia temperatury zapłonu.

Obniżenie temperatury zapłonu oleju podczas eksploatacji silnika z dużym prawdopodobieństwem świadczy o przedostaniu się paliwa do układu smarowania. Metoda ta może być stosowana zarówno w przypadku silników zasilanych paliwami destylacyjnymi, takimi jak MGO (Marine Gas Oil) i MDO (Marine Diesel Oil), jak również paliwami pozostałościowymi typu HFO (Heavy Fuel Oil). Dzięki temu stanowi skuteczne narzędzie jakościowej oceny występowania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem w większości zastosowań eksploatacyjnych.

Do zalet tej metody należy możliwość wykonywania analiz na niewielkich objętościach próbek, zwykle od 1 do 2 ml, a także zdolność wykrywania alkoholi stosowanych jako dodatki paliwowe, np. etanolu. Oprócz samego stwierdzenia obecności paliwa możliwe jest również oszacowanie jego zawartości w oleju smarowym. W przypadku analiz ilościowych konieczna jest jednak znajomość rodzaju badanego oleju.

Choć metoda oznaczania temperatury zapłonu posiada pewne ograniczenia, pozostaje jednym z najbardziej użytecznych i praktycznych sposobów oceny rozcieńczenia oleju smarowego paliwem. Należy jednak uwzględnić, że obniżenie temperatury zapłonu nie zawsze jest jednoznacznie związane z obecnością paliwa w oleju. Podobny efekt mogą powodować również inne czynniki, takie jak: mieszanie olejów o różnych właściwościach czy zmiany zachodzące w oleju w wyniku procesów starzeniowych podczas eksploatacji. Ponadto zdarzają się sytuacje, w których pomimo obecności paliwa temperatura zapłonu nie ulega znacznemu obniżeniu [37]. Może to wynikać z rozwarstwiania się mieszaniny oleju i paliwa lub odparowania najbardziej lotnych frakcji węglowodorowych, które w największym stopniu odpowiadają za spadek temperatury zapłonu. W takich przypadkach w oleju pozostają głównie cięższe składniki paliwa, wywierające znacznie mniejszy wpływ na wartość badanego parametru [38].

Pomimo wskazanych ograniczeń, pomiar temperatury zapłonu stanowi jedną z najskuteczniejszych metod wykrywania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem. Metoda ta charakteryzuje się prostotą wykonania, stosunkowo niskimi kosztami badań oraz wysoką czułością na obecność lekkich frakcji paliwowych. Dodatkowo jest powszechnie stosowana zarówno w laboratoriach diagnostycznych, jak i w praktyce eksploatacyjnej, co potwierdza jej dużą wartość diagnostyczną.

W połączeniu z innymi metodami analizy oleju umożliwia wiarygodną ocenę stanu środka smarowego oraz skuteczne monitorowanie procesów zachodzących w eksploatowanych silnikach. W rezultacie metoda oznaczania temperatury zapłonu może być uznana za jeden z najlepszych i najbardziej rozpowszechnionych sposobów identyfikacji rozcieńczenia oleju smarowego paliwem.

Poza metodami opartymi na analizie lepkości i temperatury zapłonu stosowane są również bardziej zaawansowane techniki diagnostyczne służące ocenie zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem [38, 39]. W wielu przypadkach są to rozwiązania zastrzeżone (ang. *proprietary methods*), których szczegóły nie są publicznie udostępniane [38].

Zestawienie głównych metod badawczych oraz ich wad i zalet przedstawiono w tabeli 2.2.

Metody bazujące na analizie lotności oleju mogą być wykorzystywane do identyfikacji zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem oraz określenia stopnia jego rozcieńczenia oraz dynamiki tego procesu, przy dostępności odpowiednich charakterystyk lub próbek referencyjnych. Do tej grupy należą między innymi techniki wyznaczania temperatur odparowania określonych udziałów objętościowych próbki, początkowej temperatury wrzenia oraz wskaźników pochodnych opartych na tych parametrach. Wybrane metody tego typu zostały omówione w podrozdziale 2.2 niniejszej monografii.

Ocena lotności stanowi użyteczne narzędzie do określania poziomu rozcieńczenia oleju smarowego olejem napędowym. Należy jednak zaznaczyć, że – podobnie jak w przypadku oznaczania temperatury zapłonu – uzyskane wyniki mogą być niejednoznaczne, jeśli podczas eksploatacji zanieczyszczonego oleju doszło już do odparowania części lekkich frakcji paliwa.

Wśród metod znormalizowanych opartych na właściwościach lotnościowych można wymienić wycofaną w 2022 roku normę ASTM D322-97(2016) [40], wykorzystującą proces destylacji do oceny stopnia rozcieńczenia oleju smarowego benzyną. Zbliżone podejście reprezentuje test odparowalności Noacka, polegający na określeniu udziału masowego próbki, który odparowuje podczas wygrzewania oleju przez jedną godzinę w temperaturze 250 °C. Procedura ta została opisana m.in. w normach ASTM D5800-21 [41] oraz CEC L-40-A-93 [42].

Wśród metod stosowanych do wykrywania oraz oceny chwilowego stopnia rozcieńczenia olejów smarowych paliwami istotne miejsce zajmuje chromatografia gazowa (GC) [43]. Technika ta wykorzystuje procedury opisane między innymi w normach: ASTM D3524-14(2020) [44] przeznaczonej do analizy oleju smarowego zanieczyszczonego lekkim olejem napędowym, ASTM D3525-20 [45] dotyczącej wykrywania benzyny w oleju smarowym oraz ASTM D7593-14 [46] obejmującej oznaczanie zanieczyszczeń pochodzących od lekkiego oleju napędowego, paliwa biodiesel lub benzyny. Własną procedurę badawczą opracowała również Europejska Rada Koordynująca ds. Rozwoju Metod Testowych Paliw, Środków Smarowych i Innych Płynów CEC, publikując metodę CEC

Tabela 2.2. Porównanie metod wykrywania zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem (opracowano na podstawie [38, 39])

Metoda	Zalety	Wady
Chromatografia gazowa	Szeroko wykorzystywana w przemyśle; oferuje wysoką dokładność; jest odpowiednia dla dużych laboratoriów; umożliwia wykrycie biopaliw typu biodiesel i etanol	Może być stosowana tylko w laboratoriach; wymaga zakupu drogiego wyposażenia i wykorzystania gazów; wymaga dużo czasu na opracowanie wyników
Analiza lepkości	Dostępna jest aparatura przenośna i laboratoryjna; stosuje się ją jako rutynową metodę okresowego sprawdzania olejów; stanowi optymalne rozwiązanie do wykrywania rozcieńczenia oleju smarowego olejem napędowym; daje możliwość wykrycia etanolu i biopaliw typu biodiesel	Jest niewystarczająca do jednoznacznego wykrycia rozcieńczenia oleju smarowego olejem napędowym, gdyż zmiana lepkości oleju może mieć różne przyczyny; wymaga dokładności od technika wykonującego analizę
Pomiar temperatury zapłonu	Jest dobrą jakościową (dwustanową) oceną wystąpienia rozcieńczenia oleju smarowego olejem napędowym w większości przypadków zastosowania; daje możliwość wykrycia etanolu; bardzo małe próbki testowanego oleju (1–2 ml) są wystarczające do oceny	Niemożliwe jest wykrycie biopaliw typu biodiesel; wymaga dokładności od technika wykonującego analizę; konieczna jest wiedza o rodzaju oleju smarowego i paliwa w celu przeprowadzenia oceny ilościowej stopnia rozcieńczenia; występuje ryzyko pożarowe stwarzane przez podgrzewanie próbek zawierających paliwo
Ocena lotności oleju (wskaźniki lotności, krzywa destylacji, temperatury odparowania frakcji itp.)	Dobra dwustanowa metoda oceny rozcieńczenia oleju; wykorzystuje powszechnie znane w chemii metody analityczne; daje możliwość wykrycia lotnych zanieczyszczeń oleju smarowego	Wymaga dokładności od technika wykonującego analizę; konieczna jest wiedza o rodzaju oleju smarowego i paliwa w celu przeprowadzenia oceny ilościowej stopnia rozcieńczenia; występuje ryzyko pożarowe stwarzane przez podgrzewanie próbek zawierających paliwo
Spektrometria w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR)	Po zakupieniu urządzenia jednostkowe koszty wykonania testu próbki są niskie; czas wykonania analizy jest krótki	Wymaga zastosowania drogiego wyposażenia; zwykle wymagana jest kalibracja dla określonego wąskiego zakresu składu badanych próbek
Wykrywanie powierzchniowych fal akustycznych (SAW)	Metoda łatwa w użyciu; aparatura jest przenośna; do przeprowadzenia badania wystarczy próbka 0,5 ml; metoda jest tańsza od chromatografii gazowej; zapewnia szybkie pomiary; jest prosta w adaptacji do różnych rodzajów olejów smarowych i paliw	Niemożliwe jest wykrycie paliw typu biodiesel; konieczna jest kalibracja z wykorzystaniem cieczy referencyjnych

L-94-10 [47]. W analizach chromatograficznych do ilościowego określania poziomu rozcieńczenia oleju smarowego często stosowane są detektory płomieniowo-jonizacyjne (FID) [48], co zostało opisane m.in. w pracy [39].

Alternatywne rozwiązania bazujące na chromatografii gazowej zostały opracowane przez Japoński Instytut Nafty (ang. *The Japan Petroleum Institute*) i opisane w normach: JPI-5S-23-2017 [49], stanowiącej odpowiednik ASTM D3524-14(2020) oraz JPI-5S-24-2017 [50], będącej alternatywą dla ASTM D3525-20. Ze względu na własnościowy charakter tych metod ich pełna dokumentacja nie jest publicznie dostępna. Podstawowe informacje dotyczące ich działania można jednak znaleźć w wybranych publikacjach technicznych [51, 52, 53, 54].

Do identyfikacji obecności paliwa w oleju smarowym wykorzystywana jest również spektrometria FTIR [55]. Metoda ta wyróżnia się stosunkowo prostą obsługą aparatury oraz możliwością szybkiego określenia poziomu rozcieńczenia oleju paliwem. Jej ograniczeniem jest natomiast brak możliwości jednoznacznego przypisania wykrywanych węglowodorów do konkretnego materiału źródłowego. Przykłady zastosowania FTIR do tego typu analiz przedstawiono w pracach [56, 57]. Standaryzację wykorzystania tej techniki w diagnostyce eksploatacyjnej olejów smarowych zawiera norma ASTM E2412-10(2018) [58].

Innym rozwiązaniem stosowanym do wykrywania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem jest specjalistyczny przyrząd Spectro Q6000 fuel dilution meter (FDM). Urządzenie wykorzystuje czujnik powierzchniowej fali akustycznej (SAW), umożliwiający rejestrację obecności par paliwa [39]. Aktualnie oferowane są dwa modele tej serii. Wersja FDM 6000 pozwala na zapisanie w pamięci parametrów kalibracyjnych dla jednego rodzaju oleju smarowego i określonego paliwa, natomiast FDM 6001 umożliwia przechowywanie danych kalibracyjnych dla trzech różnych kombinacji olejów smarowych i paliw [45]. Zasady stosowania tej metody zostały opisane w normie ASTM D8004-15 [59].

W ocenie stopnia rozcieńczenia olejów smarowych paliwami destylacyjnymi i/lub pozostałościowymi, poza wymienionymi wyżej, stosuje się również bardziej zaawansowane metody analityczne. Do tej grupy należą między innymi chromatografia gazowa sprzężona ze spektrometrią mas (GC-MS) [38], spektrofluorymetria w zakresie ultrafioletu (UV) [60, 61, 62], spektroskopia magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR) [38, 63], a także spektroskopia elektronowego rezonansu spinowego (ESR). Warto zaznaczyć, że firma Mobil Oil Corporation już w 1990 roku zaproponowała wykorzystanie metody ESR do oznaczania zawartości paliw pozostałościowych w olejach smarowych [64]. Stosowane są również rozwiązania hybrydowe, łączące techniki NMR oraz GC-MS [38]. Metody te cechują się jednak wysokimi kosztami realizacji oraz często bazują na procedurach objętych ochroną własności intelektualnej. Przykładem jest metoda ExxonMobil RFD (ang. *Residual Fuel Detection*), wykorzystująca oznaczanie zawartości wanadu do identyfikacji obecności paliwa pozostałościowego [65].

Wymienione metody służą do oceny wystąpienia rozcieńczenia oleju smarowego paliwem, jednak nie umożliwiają bezpośredniej oceny jego intensywności (szybkości) rozcieńczania oleju w silniku, co było podstawą opracowania metody MORSO przedstawionej w niniejszej pracy. Z kolei intensywność rozcieńczania może posłużyć do oceny długości okresu (zapasu czasu) do uzyskania przez olej progowego stopnia rozcieńczenia, przy którym należy podjąć określone działania eksploatacyjne (identyfikacja problemu, wymiana lub odświeżenie oleju, remont silnika).

Przedstawione w niniejszym podrozdziale metody wykrywania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem stosowane okresowo mogą zostać wykorzystane właśnie do oceny intensywności procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem podczas pracy silnika. W badaniach zaprezentowanych w monografii wykorzystano pomiar temperatury zapłonu oleju smarowego jako bazę dla empiryczno-analitycznej metody MORSO służącej do oceny szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem. Wybór temperatury zapłonu jako nośnika informacji o rozcieńczeniu oleju smarowego paliwem wynikał przede wszystkim z prostoty pomiaru, niskich kosztów jego realizacji oraz powszechnej dostępności aparatów pomiarowych. Z tych samych powodów technika ta obok pomiaru lepkości oleju należy do najczęściej wykorzystywanych w praktyce eksploatacyjnej podczas rutynowej kontroli obiegowych olejów smarowych stosowanych w silnikach okrętowych.

2.3. Zasady pobierania z silnika próbek oleju

W przypadku metod wykorzystujących temperaturę zapłonu oleju do oceny jego rozcieńczenia paliwem prawidłowy sposób pobrania próbki ma szczególne znaczenie, ponieważ lokalne różnice w składzie oleju mogą prowadzić do błędnej oceny rzeczywistego poziomu rozcieńczenia w całym układzie smarowania.

Wiarygodność wyników badań właściwości fizykochemicznych oleju smarowego zależy nie tylko od zastosowanej metody analitycznej, lecz również od prawidłowego sposobu pobrania próbki. Próbka oleju powinna reprezentować rzeczywisty stan oleju znajdującego się w układzie smarowania silnika, a jej skład nie może być zmieniony w wyniku niewłaściwego wyboru miejsca poboru, zanieczyszczenia naczynia lub nieodpowiednich warunków pobierania. Kwestie te podlegają standaryzacji [66].

W przypadku oceny stopnia rozcieńczenia oleju smarowego paliwem szczególne znaczenie ma uzyskanie próbki pochodzącej z głównego strumienia oleju przepływającego przez układ smarowania. Pobranie oleju z miejsc o ograniczonej cyrkulacji, takich jak zbiorniki, przestrzenie martwe lub odgałęzienia instalacji,

może prowadzić do uzyskania wyników odbiegających od rzeczywistego stanu eksploatacyjnego oleju.

Podczas wyboru punktu poboru próbki należy stosować następujące zasady [67]:

- próbki powinny być pobierane każdorazowo z tego samego, wcześniej ustalonego punktu instalacji olejowej, co umożliwia porównywanie wyników uzyskiwanych w kolejnych okresach eksploatacji;
- zalecanym miejscem poboru jest przewód tłoczny pompy oleju, za urządzeniami oczyszczającymi (np. filtrami lub wirówkami), bezpośrednio przed doprowadzeniem oleju do silnika;
- w przypadku przewodów poziomych punkt poboru powinien znajdować się na bocznej powierzchni rurociągu, a nie w jego dolnej części, gdzie mogą gromadzić się osady i cięższe zanieczyszczenia;
- próbkę należy pobierać z instalacji zapewniającej ciągły przepływ oleju, unikając miejsc, w których olej może pozostawać w stanie stagnacji;
- przed właściwym pobraniem należy spuścić niewielką ilość oleju w celu przepłukania zaworu poboru oraz usunięcia pozostałości oleju zalegającego w przewodzie lub zanieczyszczeń zgromadzonych w jego pobliżu.

Pobieranie próbki powinno odbywać się podczas normalnej pracy silnika, przy ustalonych parametrach eksploatacyjnych, w szczególności przy temperaturze oleju odpowiadającej warunkom roboczym oraz obciążeniu zbliżonym do nominalnego. Takie warunki zapewniają odpowiednią homogenizację oleju w układzie i ograniczają wpływ chwilowych zmian jego składu.

Do poboru i transportu próbek należy stosować wyłącznie czyste, suche pojemniki przeznaczone do tego celu, najlepiej jednorazowego użytku. Pojemniki powinny być szczelnie zamknięte bezpośrednio po pobraniu próbki, zabezpieczone przed wpływem czynników zewnętrznych oraz odpowiednio oznakowane.

Opis próbki powinien umożliwiać jej jednoznaczną identyfikację i powinien obejmować co najmniej [67]:

- nazwę armatora,
- nazwę statku,
- typ i nazwę stosowanego oleju smarowego,
- datę pobrania próbki,
- miejsce pobrania próbki oraz nazwę urządzenia,
- czas pracy silnika lub urządzenia,
- czas eksploatacji badanego oleju od ostatniej wymiany lub uzupełnienia.

Dla potrzeb analizy rozcieńczenia oleju paliwem szczególnie istotne są informacje dotyczące czasu pracy oleju oraz warunków eksploatacji silnika. Dane te umożliwiają właściwą interpretację zmian właściwości oleju i odniesienie uzyskanych wyników do rzeczywistych warunków pracy jednostki.

Częstotliwość pobierania próbek zależy od rodzaju urządzenia, warunków eksploatacji oraz zakresu prowadzonego programu diagnostycznego. W standardowych warunkach eksploatacji zaleca się wykonywanie badań oleju [23, 67, 68]:

- co około 6 miesięcy dla wolnoobrotowych silników wodzikowych,
- co 3–6 miesięcy dla średnioobrotowych silników bezwodzikowych,
- co około 12 miesięcy dla olejów stosowanych w układach turbinowych, hydraulicznych oraz przekładniowych.

W przypadku nowych silników, a także jednostek pracujących w trudnych warunkach eksploatacyjnych, okresy pomiędzy badaniami powinny być odpowiednio skrócone. Niezależnie od regularnych analiz okresowych, dodatkowe próbki powinny być pobierane w przypadku wystąpienia niepokojących objawów eksploatacyjnych, takich jak wzrost zużycia oleju, zmiana jego wyglądu, wzrost temperatury pracy lub podejrzenie przedostawania się paliwa do układu smarowania.

W praktyce eksploatacyjnej korzystnym momentem poboru próbki jest okres bezpośrednio poprzedzający rozpoczęcie manewrów portowych, gdy statek znajduje się jeszcze w warunkach ustalonej pracy, a próbka może zostać przekazana do analizy laboratoryjnej. W przypadku podejrzenia procesów biodegradacji oleju zakres badań należy rozszerzyć o analizę mikrobiologiczną, obejmującą dodatkowe próbki pobrane z miejsc potencjalnego występowania mikroorganizmów.

Wyniki analizy oleju powinny być zawsze interpretowane w odniesieniu do historii eksploatacji silnika oraz wcześniejszych wyników badań. Na tej podstawie laboratorium diagnostyczne może określić możliwość dalszej eksploatacji oleju, konieczność korekty jego parametrów lub potrzebę jego wymiany.

2.4. Zmiana temperatury zapłonu oleju smarowego w trakcie pracy silnika

Temperatura zapłonu obok temperatury samozapłonu i opóźnienia zapłonu jest jednym z kluczowych wskaźników charakteryzujących właściwości zapłonowe paliw. Jest to również wskaźnik charakteryzujący oleje smarowe w aspekcie ich bezpiecznego i niezawodnego użytkowania w założonych temperaturach pracy.

Zgodnie z normą PN-EN IEC 60079-10-1:2021-09 [69], temperatura zapłonu substancji oznacza najniższą temperaturę cieczy, przy której w warunkach standardowych wydziela ona taką ilość par, która po zmieszaniu z powietrzem tworzy mieszaninę palną. Jest to również najniższa temperatura próbki analitycznej, odniesiona do ciśnienia atmosferycznego 101,3 kPa, przy której zadziałanie źródła zapłonu powoduje krótkotrwałe zapalenie się par nad powierzchnią cieczy [70].

Z kolei temperatura samozapłonu to najniższa temperatura, w której substancja palna ulega samoczynnemu zapłonowi w obecności powietrza, bez konieczności zastosowania zewnętrznego źródła zapłonu, takiego jak płomień czy iskra [71]. Wartość temperatury samozapłonu jest zawsze wyższa niż temperatura zapłonu.

Rozcieńczenie oleju silnikowego paliwem jest zjawiskiem występującym podczas eksploatacji silników spalinowych. Zachodzi szczególnie przy złym stanie technicznym aparatury paliwowej, instalacji drenażu przecieków paliwa i nieszczelności zespołu tłokowo-cylindrowego. Ponadto niezależnie od stanu technicznego silnika do rozcieńczania oleju smarowego paliwem dochodzi w warunkach częstych rozruchów i pracy silnika na zimno, pracy przy bardzo niskich obciążeniach oraz w przypadku silników pojazdów lądowych podczas regeneracji filtrów cząstek stałych (DPF). Paliwo przedostające się do układu smarowania miesza się z olejem, powodując zmianę jego właściwości fizykochemicznych. Jednym z najważniejszych skutków tego procesu jest obniżenie temperatury zapłonu oleju, która stanowi istotny parametr diagnostyczny wykorzystywany do oceny stopnia rozcieńczenia oleju paliwem i określenia dynamiki procesu rozcieńczania.

Mechanizm obniżania temperatury zapłonu wynika przede wszystkim z różnic w składzie chemicznym oleju silnikowego i paliwa. Oleje silnikowe składają się głównie z ciężkich węglowodorów o długich łańcuchach węglowych (powyżej C20), które charakteryzują się niską lotnością, wysoką temperaturą wrzenia oraz wysoką temperaturą zapłonu [72]. Natomiast paliwa silnikowe zawierają lżejsze frakcje węglowodorowe – w przypadku oleju napędowego głównie C12–C20, a w przypadku benzyny C4–C12 [73]. Związki te wykazują znacznie większą lotność i wyższą prężność par, dzięki czemu łatwiej przechodzą do fazy gazowej. W tabeli 2.3 przedstawiono porównanie wymienionych wskaźników dla oleju smarowego, oleju napędowego i benzyny, jako że charakteryzują one palność tych substancji.

Tabela 2.3. Porównanie wybranych właściwości oleju silnikowego i wybranych paliw (opracowanie własne na podstawie [73, 74])

Parametr	Silnikowy olej smarowy	Olej napędowy	Benzyna
Zakres liczby atomów węgla w węglowodorach	> C20	C12–C20	C4–C12
Lotność	Niska	Średnia	Wysoka
Temperatura wrzenia [°C]	> ~300	216–420	35–230
Temperatura zapłonu [°C]	> 190	> 40	−45
Prężność par	Bardzo niska	Umiarkowana	Wysoka

Po przedostaniu się paliwa do oleju, lekkie składniki paliwowe dominują w fazie gazowej nad powierzchnią mieszaniny. Powoduje to, że już przy niższych temperaturach powstaje odpowiednia ilość par palnych zdolnych do utworzenia mieszaniny zapalnej z powietrzem. W konsekwencji temperatura zapłonu mieszaniny oleju i paliwa jest niższa niż temperatura zapłonu czystego oleju. Zjawisko to jest zgodne z prawami równowagi ciecz-para, według których składniki o najwyższej lotności mają największy wpływ na skład fazy gazowej.

W praktyce eksploatacyjnej spadek temperatury zapłonu jest jednym z najczęściej wykorzystywanych wskaźników obecności paliwa w oleju. Nawet niewielka zawartość paliwa, wynosząca około 1% wag., może już powodować zauważalne obniżenie temperatury zapłonu.

2.5. Metody określania temperatury zapłonu substancji palnych

W niniejszym opracowaniu podstawowym parametrem oceny olejów smarowych w kontekście ich rozcieńczenia paliwem będzie temperatura zapłonu, która obniża się w miarę wzrostu stopnia rozcieńczenia oleju smarowego paliwem. Wynika to z faktu, że paliwa mają niższą temperaturę zapłonu niż temperatura zapłonu oleju smarowego.

Istnieje wiele metod wyznaczania temperatury zapłonu, a wybór odpowiedniej procedury zależy od kilku czynników [75]. Przede wszystkim należy uwzględnić metodę wskazaną w specyfikacji danego produktu. Na dobór sposobu pomiaru mogą również wpływać obowiązujące przepisy prawne. Jeżeli zarówno regulacje, jak i specyfikacja dopuszczają kilka metod badawczych, zaleca się wybór rozwiązania najbardziej dostępnego.

Metody oznaczania temperatury zapłonu dzielą się na dwie główne grupy: metody z użyciem tygla zamkniętego, wykorzystujące aparaty Pensky'ego–Martensa [76], Abla [77] lub Taga [78, 79], a także metody z tyglem otwartym, prowadzone przy użyciu urządzeń Tagliabue'a [80] lub Clevelanda [81].

Wyniki pomiarów temperatury zapłonu mogą się różnić w zależności od zastosowanej metody, dlatego istotne jest dokładne określenie procedury wykorzystanej podczas badania [23]. Dobór odpowiedniej metody zależy od rodzaju substancji oraz jej właściwości fizykochemicznych. Dla przykładu substancje o wysokiej lotności, takie jak wybrane alkohole czy węglowodory, mogą być analizowane metodą Abla lub metodą równowagową [82], natomiast nie stosuje się w ich przypadku metod Pensky'ego–Martensa ani Clevelanda. Z kolei produkty ropopochodne, m.in. olej napędowy, olej opałowy czy benzyna, powinny być badane metodami nierównowagowymi, takimi jak metody Pensky'ego–Martensa, Abla lub Clevelanda [75].

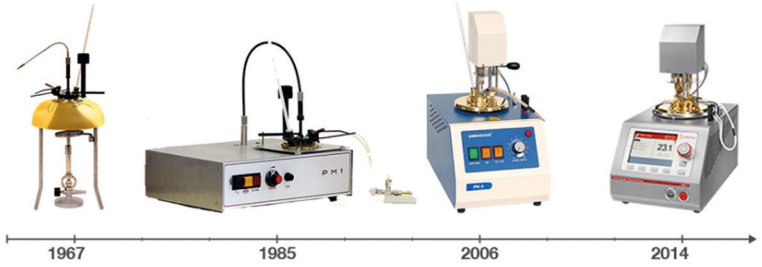
2.6. Metoda Pensky'ego–Martensa

Temperaturę zapłonu w eksperymentach wstępnych oraz w przykładzie aplikacyjnym przedstawionych w niniejszej monografii określono w tyglu zamkniętym Pensky'ego–Martensa zgodnie z normą PN-EN ISO 2719:2016 [76].

Nazwa metody pochodzi od wynalazców Bertholda Pensky'ego i Adolfa Martensa, którzy w 1873 roku wynaleźli tester temperatury zapłonu wykorzystujący tygiel zamknięty [83].

Aparat Martensa bazował na oryginalnym testerze Pensky'ego, a jego modyfikacja miała na celu badanie temperatury zapłonu znacznie przekraczającej wartość 100 °C w celu testowania olejów smarowych i innych podobnych produktów, takich jak produkty bitumiczne.

W ubiegłym stuleciu ręczny tester kielichowy Pensky'ego–Martensa został udoskonalony, stając się w pełni automatycznym urządzeniem (rys. 2.3). Na przestrzeni kolejnych lat metoda została udoskonalona [84].



Rys. 2.3. Rozwój aparatów Pensky'ego–Martensa od instrumentu manualnego do automatycznego [84] (reprodukowano za zgodą Anton Paar Poland Sp. z o.o.)

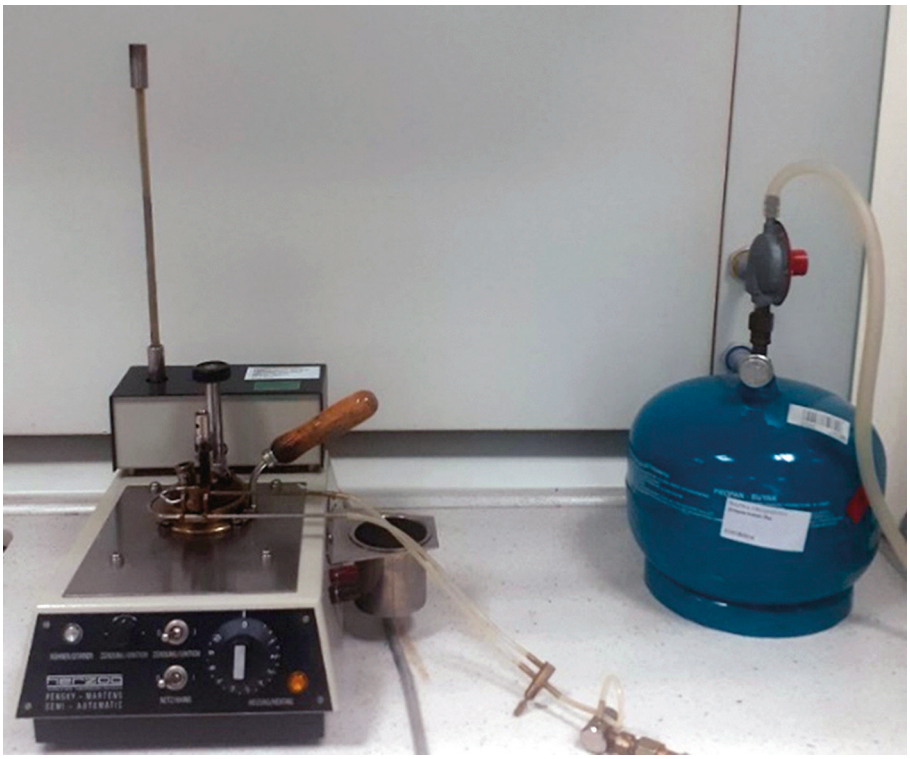
Widok aparatu wykorzystanego przez autora do pomiaru temperatury zapłonu olejów badanych w latach 2022–2026 przedstawiono na rysunku 2.4. Jest to aparat Flashpoint Pensky–Martens Semi-Automatic (Walter Herzog GmbH, Lauda-Königshofen, Niemcy).

Aparat umożliwia pomiary temperatury zapłonu olejów w zakresie 50,0–224 °C, a więc maksymalne wartości wymienionych wskaźników wynoszą odpowiednio: r_t = 2,5 °C, R_t = 7,7 °C i u = 8,3 °C).

Zgodnie z normą PN-EN ISO 2719:2016 [76] temperatura zapłonu zaobserwowana podczas pomiaru podlega korekcji do standardowego ciśnienia atmosferycznego równego 101,3 kPa zgodnie z zależnością:

$$t_{FP} = t_d + 0{,}25 \cdot (101{,}3 - p_{at}) \tag{2.9}$$

gdzie: t_d – zaobserwowana temperatura zapłonu [°C], p_{at} – bezwzględne ciśnienie atmosferyczne [kPa].



Rys. 2.4. Aparat Flashpoint Pensky–Martens Semi-Automatic firmy Walter Herzog GmbH wykorzystany w badaniu (fot. M. Szmukała)

Zależność 2.9 jest dowiedziona i słuszna w zakresie ciśnień atmosferycznych równych 82,0–104,7 kPa [76].

Wartości powtarzalności r_t, odtwarzalności R_t i niepewności u dla badanych próbek olejów smarowych w przypadku wykorzystywanego aparatu wyliczane są odpowiednio zgodnie z zależnościami:

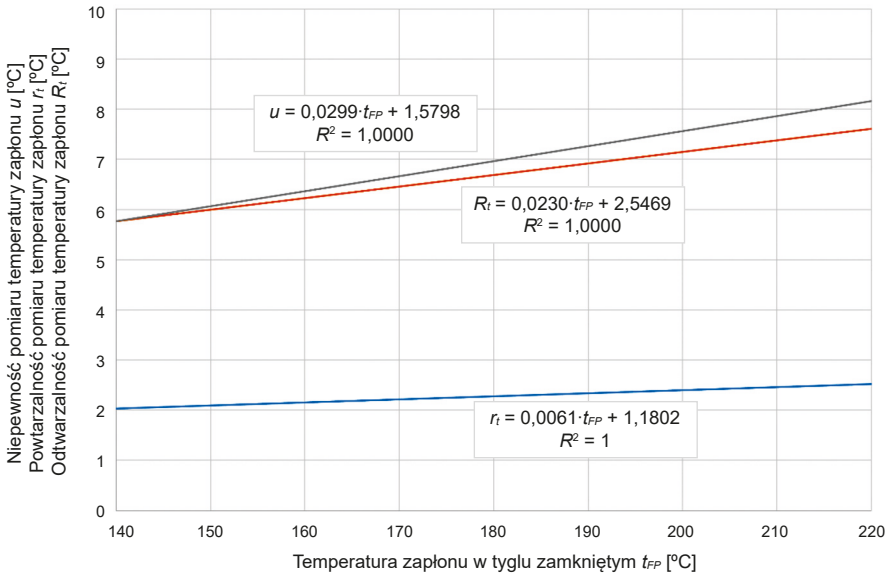
$$r_t = 0{,}0061\ t_{FP} + 1{,}1802 \tag{2.10}$$

$$R_t = 0{,}0230\ t_{FP} + 2{,}5469 \tag{2.11}$$

$$u = 0{,}0299\ t_{FP} + 1{,}5798 \tag{2.12}$$

Na rysunku 2.5 przedstawiono wartości powtarzalności r_t, odtwarzalności R_t i niepewności u dla rozpatrywanych w niniejszej pracy wartości temperatury zapłonu.

Zestawienie danych badawczych pozyskanych z wykorzystaniem metody Pensky'ego–Martensa i użytych w niniejszej pracy przedstawiono w załączniku Z1.



Rys. 2.5. Zmienność powtarzalności r_t, odtwarzalności R_t i niepewności u pomiaru temperatury zapłonu dla rozpatrywanych w pracy wartości t_{FP}

Metoda naukowa nie może nas doprowadzić do prawdy ostatecznej.
Musimy zadowolić się tym, że przybliża nas ona do niej o jeden krok.
Albert Einstein (14.3.1879 – 18.4.1955)

Człowiek to zwierzę wytwarzające narzędzia.
Benjamin Franklin (17.1.1706 – 17.4.1790)

3. METODA MORSO OCENY SZYBKOŚCI ROZCIEŃCZANIA OLEJU SMAROWEGO PALIWEM

3.1. Szczegółowa procedura obróbki danych

Zaproponowana przez autora i opisana w niniejszej pracy metoda MORSO oceny szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem oparta jest na wynikach rutynowych okresowych pomiarów laboratoryjnych oleju smarowego w akredytowanych laboratoriach na próbkach olejów wysyłanych ze statków zgodnie z przyjętym harmonogramem i procedurami przyjętymi przez danego armatora. Jest to standardowe działanie, które dotyczy olejów każdego typu, w tym również olejów obiegowych silników okrętowych.

Dysponując zbiorem danych o kolejnych następujących po sobie okresach o liczebności równej n dla użytkowania oleju w postaci czasu trwania każdego i-tego okresu τ_i [h] i temperaturze zapłonu próbki oleju określonej dla chwil na koniec każdego okresu t_{FPi} [°C] między poborem próbki, czyli zestawem danych postaci:

$$\Omega_{FP} = \left[(\tau_1, t_{FP1}), (\tau_2, t_{FP2}), \ldots (\tau_n, t_{FPn})\right] \tag{3.1}$$

gdzie: $i = 1, 2, \ldots n$, możemy wyznaczyć równanie regresji liniowej postaci:

$$t_{FP} = a + b\tau \tag{3.2}$$

gdzie: a – wyraz wolny [°C], b – współczynnik kierunkowy (°C/h).

Wyraz wolny a reprezentuje uśrednioną początkową wartość temperatury zapłonu badanego oleju, czyli jest bliski wartości temperatury oleju świeżego smarowego (nierozcieńczonego paliwem). Natomiast współczynnik kierunkowy b w związku z tym, że temperatura zapłonu jest w przypadku rozcieńczenia oleju paliwem funkcją malejącą w czasie, jego wartości są ujemne, a wartość bezwzględna $|b|$ tym większa im intensywniejszy jest proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem w danym silniku. Klasyczne estymatory metody najmniejszych kwadratów mają postać:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\tau_i - \bar{\tau}\right)\left(t_{FPi} - \overline{t_{FP}}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(\tau_i - \bar{\tau}\right)^2} \tag{3.3}$$

$$a = \overline{t_{FP}} - b\bar{\tau} \tag{3.4}$$

gdzie wartości średnie długości okresów i temperatury zapłonu na koniec każdego okresu wynoszą odpowiednio:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\tau_i \tag{3.5}$$

$$\overline{t_{FP}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}t_{FPi} \tag{3.6}$$

Danej określonej w warunkach eksploatacyjnych liczby m zbiorów Ω_{FP1}, Ω_{FP2},… Ω_{FPm} wyznacza się w analogiczny sposób współczynniki równań regresji a_j i b_j, gdzie $j = 1,2\ldots m$, korzystając z zależności (3.8)–(3.9), co daje układ równań postaci:

$$\begin{cases} t_{FP1} = a_1 + b_1\tau \\ t_{FP2} = a_2 + b_2\tau \\ \quad\cdots \\ t_{FPj} = a_j + b_j\tau \\ \quad\cdots \\ t_{FPm} = a_m + b_m\tau \end{cases} \tag{3.7}$$

Dla równań opisanych formułą (3.12) w kolejnym kroku wyznacza się współczynniki dla charakterystyki stanowiącej uśrednioną wartość temperatury zapłonu t_{FPS}:

$$t_{FPS} = \bar{a}_j + \bar{b}_j\tau \tag{3.8}$$

gdzie:

$$\bar{a} = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}a_j \tag{3.9}$$

$$\bar{b} = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}b_j \tag{3.10}$$

Wraz ze wzrostem zawartości oleju napędowego w oleju smarowym silnika, wynikającym z przecieków paliwa podczas eksploatacji, stopień rozcieńczenia oleju ulega zwiększeniu, czemu towarzyszy jednoczesny spadek jego temperatury zapłonu. W kolejnym kroku zaproponowanej metody określa się uśredniony czas τ_{gr}, po którym olej w instalacji smarowania obiegowego silnika uzyska wartość progową temperatury zapłonu, poniżej której olej nie spełnia wymagań

producenta i powinien zostać wymieniony. Czas ten związany jest z uzyskaniem przez olej progowej wartości temperatury zapłonu $t_{FP\mathrm{gr}}$.

Dysponując zależnością (3.8), należy więc określić wartość $\tau = \tau_{\mathrm{gr}}$, czyli wartość, dla której prawdziwa jest zależność:

$$t_{FPS}(\tau) = t_{FP\mathrm{gr}} \tag{3.11}$$

czyli wyznaczyć τ na podstawie zależności:

$$\bar{a}_j + \bar{b}_j \tau = t_{FP\mathrm{gr}} \tag{3.12}$$

Graniczny szacunkowy czas użytkowania oleju od chwili, gdy w instalacji znajdował się wyłącznie świeży olej silnikowy wynosi w takim przypadku:

$$\tau_{\mathrm{gr}} = \frac{t_{FP\mathrm{gr}} - \bar{a}_j}{\bar{b}_j} \tag{3.13}$$

gdzie: $\bar{b}_j \neq 0$.

Ostatnim etapem realizacji przedstawionej metody jest określenie szybkości (intensywności) procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem w analizowanym silniku, co stanowi główny cel realizacji przedmiotowej empiryczno-analitycznej metody. Podstawę do tego oszacowania stanowi progowy C_{gr} (% wag. paliwa w oleju smarowym) dopuszczalny stopień rozcieńczenia, przy którym producenci silników rekomendują wymianę oleju. Średnia szybkość v (% wag./h) narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem może być opisana wskaźnikiem szybkości procesu postaci:

$$v = \frac{C_{\mathrm{gr}} - C(\tau = 0)}{\tau_{\mathrm{gr}}} \tag{3.14}$$

Ponieważ w chwili początkowej zakładamy, że w silniku znajduje się wyłącznie świeży, nierozcieńczony paliwem olej smarowy, to zachodzi zależność:

$$C(\tau = 0) = 0 \tag{3.15}$$

A więc zależność (3.14) przyjmuje postać:

$$v = \frac{C_{\mathrm{gr}}}{\tau_{\mathrm{gr}}} \tag{3.16}$$

W związku z tym, że proces rozcieńczania oleju smarowego w silniku jest długotrwały, dla celów praktycznych przyjęto, że jednostka będzie odniesiona do 1000 h pracy silnika smarowanego danym olejem. Tak określony wskaźnik szybkości procesu rozcieńczania opisuje równanie:

$$v_{1000} = 1000 \cdot \frac{C_{\mathrm{gr}}}{\tau_{\mathrm{gr}}} \tag{3.17}$$

W rozdziale 4 przedstawiono przykładowe analizy zestawów danych o temperaturze zapłonu zgodnie z przedstawioną metodyką, dla których wyznaczono wartości reprezentowane przez wskaźniki opisane zależnościami (3.13) i (3.17).

3.2. Uzasadnienie przyjęcia modelu liniowego w opracowanej metodzie

Wykorzystanie modelu liniowego do opisu procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem wynika z założenia, że w typowych warunkach eksploatacyjnych wzrost zawartości paliwa w oleju ma charakter narastający w czasie, a jego intensywność może być opisana za pomocą parametru określającego szybkość zmian.

Model liniowy pozwala na uśrednienie wpływu krótkookresowych wahań wartości pomiarowych oraz wyznaczenie ogólnej tendencji zmian, co jest szczególnie istotne w przypadku analizy danych eksploatacyjnych uzyskiwanych w warunkach rzeczywistej pracy silnika. Takie podejście umożliwia ilościową ocenę tempa degradacji właściwości oleju smarowego oraz porównanie intensywności procesu rozcieńczania w różnych warunkach pracy i dla różnych stanów technicznych układu.

Należy przy tym zaznaczyć, że model liniowy opisuje dominujący trend zmian zachodzących w czasie i nie jest przeznaczony do identyfikacji krótkotrwałych, nagłych zdarzeń awaryjnych, których wykrycie wymaga zastosowania dodatkowych kryteriów diagnostycznych.

Zastosowanie modeli liniowych przedstawionych w podrozdziale 3.1 podczas prowadzenia analizy zmian właściwości oleju smarowego w funkcji czasu eksploatacji τ uzasadnione jest zarówno względami teoretycznymi, jak i praktycznymi.

W rzeczywistych układach smarowania silników okrętowych procesy degradacji, takie jak wzrost rozcieńczenia paliwem i związany z tym spadek temperatury zapłonu oleju smarowego, mają charakter nieliniowy [85]. Jest to szczególnie widoczne przy dużym stopniu rozcieńczenia oleju smarowego paliwem, co w ogólnej postaci dla parametru y można przedstawić jako zależność funkcyjną postaci:

$$y(\tau) = f(\tau) \tag{3.18}$$

Jednak w ograniczonym zakresie eksploatacyjnym zależności te mogą być skutecznie aproksymowane funkcją liniową jako pierwszym przybliżeniem rozwinięcia Taylora w otoczeniu punktu τ_0:

$$f(\tau) \approx f(\tau_0) + \left.\frac{df}{d\tau}\right|_{\tau_0} (\tau - \tau_0) \tag{3.19}$$

gdzie: τ_0 – punkt odniesienia czasu eksploatacji względem, którego wykonywana jest lokalna linearyzacja funkcji nieliniowej.

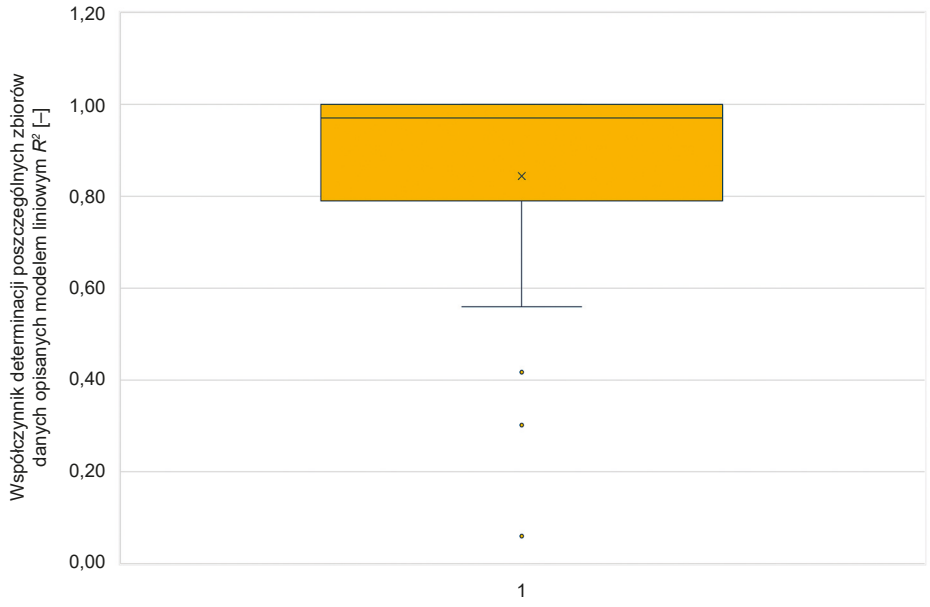
Co prowadzi do modelu postaci:

$$y(\tau) = A + B\tau \tag{3.20}$$

gdzie: $A = f(\tau_0) - b\tau_0$ i $B = \left.\frac{df}{d\tau}\right|_{\tau_0}$.

Przyjęcie takiego podejścia jest szczególnie uzasadnione w analizach ukierunkowanych na wyznaczenie czasu do przekroczenia wartości progowej, ponieważ w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych stopień rozcieńczenia oleju smarowego paliwem zazwyczaj nie przekracza 2–5% wag. Jednocześnie wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez autora wskazują, że w tym zakresie stężeń paliwa w oleju smarowym przebieg zmian temperatury zapłonu charakteryzuje się wysoką liniowością w funkcji czasu.

Potwierdzeniem tego są choćby liniowe aproksymacje zestawów danych wykorzystanych jako przykład aplikacyjny dla zaproponowanej metody przedstawiony w rozdziale 4, które z powodów technicznych przytoczone są już teraz dla celów formalnych na rysunku 3.1.



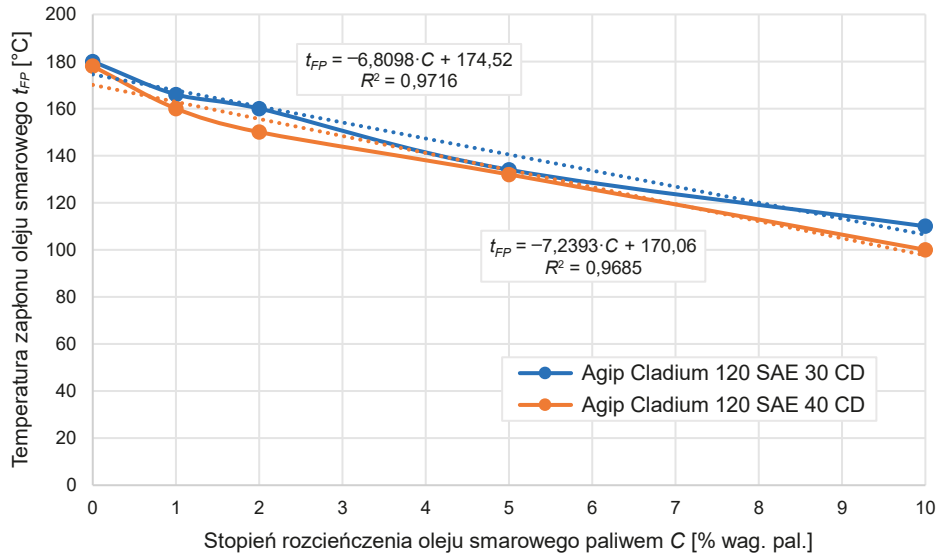
Rys. 3.1. Rozkład wartości współczynnika determinacji dla modeli opracowanych przy analizie przypadku aplikacyjnego

Jak pokazano na rysunku 3.1, dla poszczególnych zestawów danych poddanych aproksymacji uzyskano modele o wysokiej wartości współczynnika determinacji R^2. W szczególności dla 40 modeli liniowych opisujących poszczególne zestawy danych z opisu 26 obiektów analizy (silników okrętowych), miary

statystyczne współczynników determinacji wynosiły: wartość średnia 0,8437, mediana 0,9699, pierwszy kwartyl 0,7989, trzeci kwartyl 1,000, rozstęp międzykwartylowy 0,2013. Dane są silnie skupione przy wartości 1, co zawyża medianę (0,9699) względem średniej. Rozkład jest lewo-skośny (ujemna skośność). Większość uzyskanych wartości jest wysoka, z kilkoma niskimi wartościami odstającymi (np. 0,06; 0,3019; 0,417).

Przeprowadzone wcześniej przez autora badania potwierdzają również zasadność przyjęcia modelu liniowego dla opisu zmian temperatury zapłonu oleju smarowego w funkcji chwilowego stopnia rozcieńczenia oleju smarowego paliwem w zakresie stężeń oleju napędowego w oleju smarowym nieprzekraczających 10% wag.

Autor przeprowadził pomiary temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym metodą Pensky'ego–Martensa [76] dla dwóch jednosezonowych olejów smarowych klas lepkościowych Agip Cladium 120 CD/CF [86, 87] najczęściej stosowanych w instalacjach smarowania silników okrętowych, czyli SAE 30 i SAE 40. Do rozcieńczenia olejów wykorzystano olej napędowy Orlen Efecta Diesel Bio [88, 89]. Pośród innych pomiarów dokonano określenia temperatury zapłonu próbek oleju smarowego rozcieńczonego olejem napędowym dla stężeń oleju napędowego w oleju smarowym równych odpowiednio 0, 1, 2, 5 i 10% wag. [4, 90]. Charakterystyka wymienionych olejów została zawarta w załączniku Z2. Korelacja między stopniem rozcieńczenia oleju smarowego paliwem a temperaturą zapłonu dla tych olejów została przedstawiona na rysunku 3.2.

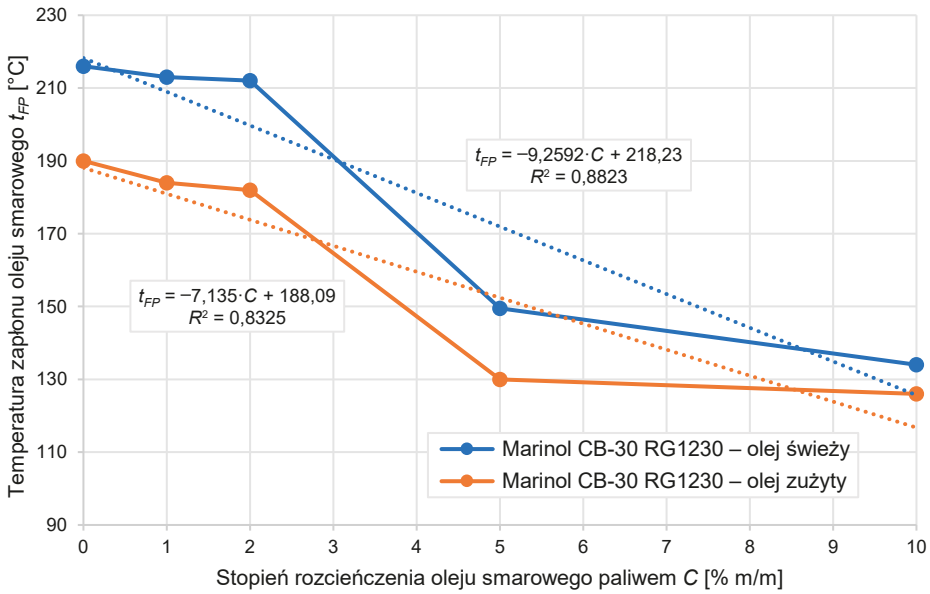


Rys. 3.2. Zależność między stopniem rozcieńczenia oleju smarowego lekkim olejem napędowym a temperaturą zapłonu olejów smarowych klas lepkościowych SAE 30 i SAE 40 (opracowano na podstawie [4, 90])

Przeprowadzony eksperyment udowadnia, że w zakresie stężeń oleju napędowego w oleju smarowym między 0 a 10% wag. zarówno dla oleju smarowego klasy SAE 30, jak i oleju smarowego SAE 40 zależność wykazuje dużą liniowość, czego potwierdzeniem jest wysoka wartość współczynnika determinacji wynoszące odpowiednio dla tych olejów R^2 = 0,9716 dla oleju klasy SAE 30 oraz R^2 = 0,9685 dla oleju klasy SAE 40.

Autor przeprowadził również eksperyment ujmujący udział innych niż paliwo zanieczyszczeń na uzyskiwane wyniki. W tym celu za pomocą aparatu Pensky'ego–Martensa przeprowadził pomiary temperatury zapłonu zużytego oleju smarowego z silnika Sulzer 5 BAH 22 będącego na wyposażeniu Laboratorium Siłowni Okrętowych Politechniki Morskiej w Szczecinie. Badany olej to Marinol CB 30 RG1230 należący do klasy lepkościowej SAE 30. Przygotowano próbki oleju rozcieńczonego paliwem – olejem napędowym Orlen Efecta Diesel Biodiesel.

Charakterystyka wykorzystanych olejów smarowych została zawarta w załączniku Z2. Pośród wykonanych badań przeprowadzono pomiary temperatury zapłonu dla zużytego oleju po 2 latach eksploatacji silnika dla stężeń oleju napędowego w oleju smarowym równych odpowiednio 0, 1, 2, 5 i 10% wag. Równolegle przeprowadzono pomiar referencyjny dla analogicznych stężeń oleju napędowego w oleju świeżym [91]. Wyniki eksperymentu zestawiono na rysunku 3.3.



Rys. 3.3. Zależność między stopniem rozcieńczenia oleju smarowego lekkim olejem napędowym a temperaturą zapłonu zużytego i świeżego oleju smarowego klasy lepkościowej SAE 30 (opracowano na podstawie [91])

Przeprowadzony eksperyment wykazuje, że w zakresie stężeń oleju napędowego w oleju smarowym między 0 a 10% wag., zarówno dla oleju smarowego, oleju świeżego, jak i oleju zużytego, zależność wykazuje dużą liniowość, czego potwierdzeniem jest wysoka wartość współczynnika determinacji wynoszącego dla badanych olejów: $R^2 = 0{,}8823$ dla oleju świeżego oraz $R^2 = 0{,}8325$ dla oleju zużytego.

Jak już wcześniej wspomniano, w analizach porównawczych należy mieć na uwadze to, jaką metodą dokonano pomiaru temperatury zapłonu. Uzyskiwany wynik pomiaru zależy od zastosowanej metody, która ma wpływ na warunki pomiaru, a tym samym uzyskiwaną wartość temperatury zapłonu.

Temperatury zapłonu świeżych olejów zawierają się zwykle w zakresie 180–250 °C [68, 92], zależnie od rodzaju oleju i metody pomiaru temperatury zapłonu. Temperatury zmierzone w tyglu zamkniętym są niższe od zmierzonych w tyglu otwartym zwykle o ok. 20–40 [23], ale w praktyce ten zakres może być szerszy (nawet 5–50 °C), co potwierdzają choćby pomiary podane w niniejszym opracowaniu zestawione w Załączniku Z2. Niestety nie ma prostej korelacji i metody przeliczenia wartości temperatury zapłonu uzyskanych różnymi metodami pomiarowymi. Dlatego pomiary kontrolne dla danego oleju powinny być realizowane tą samą metodą, aby zapewnić porównywalność wyników.

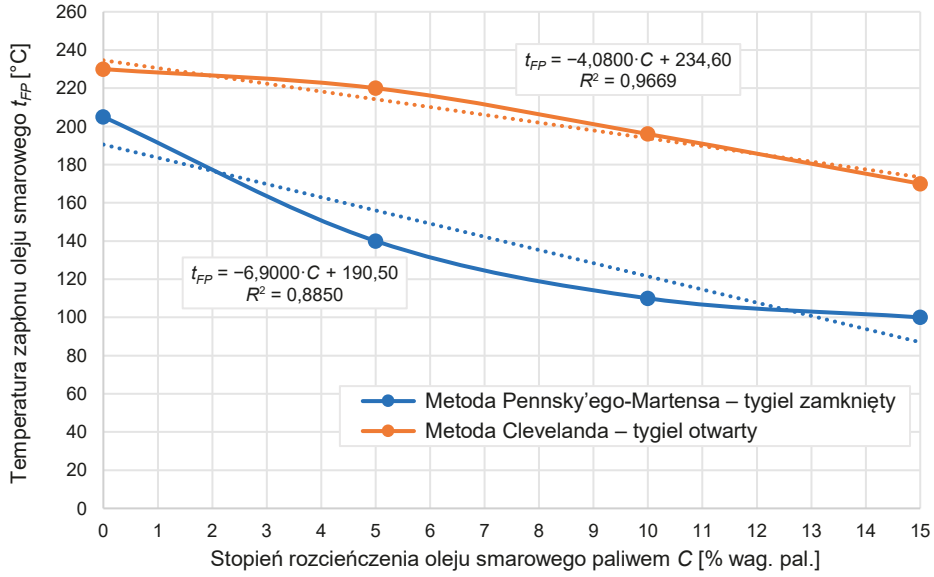
Przykładowa zależność pomiędzy stopniem rozcieńczenia oleju smarowego lekkim olejem napędowym a temperaturą zapłonu oleju przy zastosowaniu metody Clevlanda z otwartym tyglem i metody Pensky'ego–Martensa z zamkniętym tyglem pokazano na rysunku 3.4.

Również dla danych przedstawionych na rysunku 3.4 i zastosowanych różnych metod pomiaru temperatury zapłonu, korelacja między masowym udziałem paliwa w oleju smarowym a temperaturą zapłonu wykazuje dużą liniowość, czego potwierdzeniem są wysokie wartości współczynnika determinacji wynoszące dla badanych olejów $R^2 = 0{,}8850$ dla zależności przedstawiającej pomiary uzyskane metodą Pensky'ego–Martensa oraz $R^2 = 0{,}9669$ dla zależności przedstawiającej pomiary uzyskane metodą Clevelanda.

Mając powyższe na uwadze, przedstawione wyniki, w tym wysokie wartości współczynnika determinacji opisującego jakość dopasowania modelu do danych empirycznych $R^2 > 0{,}8$ pokazują, że w analizowanym zakresie eksploatacyjnym zmiany parametrów mają charakter liniowy.

Dodatkowym argumentem przemawiającym za wykorzystaniem modeli liniowych jest ich wysoka interpretowalność oraz jednoznaczna fizyczna interpretacja parametrów, gdzie wyraz wolny odpowiada wartości początkowej analizowanej wielkości, natomiast współczynnik kierunkowy stanowi miarę średniej szybkości jej zmian w czasie eksploatacji.

Ponadto modele liniowe cechują się dobrą odpornością na zakłócenia pomiarowe, stabilnością estymacji parametrów oraz niewielkimi wymaganiami obliczeniowymi, co czyni je szczególnie użytecznymi w zastosowaniach inżynierskich



Rys. 3.4. Zależność między stopniem rozcieńczenia oleju smarowego lekkim olejem napędowym a temperaturą zapłonu zmierzoną metodami Clevelanda i Pensky'ego–Martensa (opracowano na podstawie [92])

i diagnostyce eksploatacyjnej. W konsekwencji stanowią one kompromis pomiędzy dokładnością odwzorowania procesu a prostotą i użytecznością metody wyznaczania czasu do osiągnięcia wartości progowej, zwłaszcza przy założonych niskich wartościach dopuszczalnego rozcieńczenia oleju smarowego olejem napędowym nieprzekraczającym 5% wag.

3.3. Progowe wartości parametrów oleju

Firma Castrol w swoich materiałach informacyjnych [10] wskazuje, że rozcieńczenie oleju smarowego paliwem na poziomie przekraczającym 8% może prowadzić do ryzyka wybuchu w skrzyni korbowej [93].

Inni autorzy podają, że już zawartość oleju napędowego w oleju smarowym na poziomie 2–5% [13, 94] lub 3–5% [20] może stanowić zagrożenie dla poprawnej pracy silnika. Wnioski te są zgodne z wymaganiami literaturowymi dotyczącymi dopuszczalnych zmian lepkości oraz temperatury zapłonu oleju w trakcie eksploatacji.

Zgodnie z tymi wytycznymi lepkość kinematyczna oleju eksploatowanego w silniku, odniesiona do wartości oleju świeżego w temperaturze referencyjnej 40 °C lub 100 °C, nie powinna ulegać zmianie większej niż w zakresie od −10% do +10%, który uznawany jest za zakres ostrzegawczy [95]. Z kolei zmiany

w przedziale od −20% do +30% traktowane są jako zakres alarmowy, wymagający podjęcia działań prewencyjnych [24].

Według zaleceń CIMAC z 2008 roku poziom ostrzegawczy lepkości wynosi od −20% do +25% przy 40 °C oraz od −15% do +15% przy 100 °C, natomiast poziom alarmowy określono na zakres od −25% do +45% przy 40 °C oraz od −10% do +25% przy 100 °C [96]. W innych źródłach podaje się, że lepkość kinematyczna oleju obiegowego w temperaturze 100 °C nie powinna zmieniać się o więcej niż −3,0 mm²/s ani +3,5 mm²/s względem oleju świeżego [77].

W odniesieniu do temperatury zapłonu przyjmuje się, że nie powinna ona spadać poniżej około 180 °C w przypadku pomiaru w tyglu zamkniętym [37] oraz poniżej około 220 °C dla pomiaru w tyglu otwartym [97]. Dotyczy to zarówno silników bezwodzikowych, jak i wodzikowych [98]. Jednocześnie należy zaznaczyć, że pomiar temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym daje wyniki zazwyczaj o 20–40 °C niższe niż w przypadku metody z tyglem otwartym [23].

Wartości ostrzegawcze temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym dla wybranych olejów rekomendowane przez ich producentów zestawiono w tabeli 3.1. W tabeli ujęto m.in. oleje, których temperatury zapłonu były analizowane w rozdziale 4 poświęconym egzemplifikacji zaproponowanej przez autora metody MORSO oceny szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem w trakcie eksploatacji silników okrętowych. Z kolei wartości graniczne oleju zalecane przez producentów silników okrętowych zestawiono w tabeli 3.2.

Tabela 3.1. Wartości ostrzegawcze temperatury zapłonu wybranych olejów smarowych [68]

Producent	Nazwa oleju	Minimalna temperatura zapłonu w tyglu zamkniętym $t_{FP_{gr}}$ [°C]
BP	Energol DL-MP 30	~180
	Energol DL-MP 40	~180
	Energol IC-HF 303	~180
Castrol	Castrol MLC 40	~190
	Castrol MPX 30	180
	Castrol MPX 40	180
	Castrol MXD 303	180
Elf	Aurelia XT 4040	190
	Disola M3015	190
	Disola M4015	190
Mobil	Mobilgard 312	190
	Mobilgard 412	190
	Mobilgard 442	190
Orlen	Marinol RG 1230	~180
	Marinol RG 1240	~180

Tabela 3.2. Wartości graniczne temperatury zapłonu obiegowych olejów smarowych rekomendowane przez producentów silników okrętowych (opracowanie własne na podstawie [68])

Producent	Minimalna temperatura zapłonu w tyglu zamkniętym t_{FPgr} [°C]
Daihatsu	180
Deutz-MWM	190
Krupp MAK	180
MAN B&W / Everlance	185
MTU	190
Sulzer / Wärtsilä / WinGD	180
Yanmar	180

Analiza danych literaturowych oraz zaleceń producentów olejów smarowych i silników okrętowych wskazuje, że temperatura zapłonu oleju smarowego mierzona w tyglu zamkniętym stanowi istotny wskaźnik stopnia jego rozcieńczenia paliwem i może zostać wykorzystana w analizie dynamiki procesu rozcieńczania.

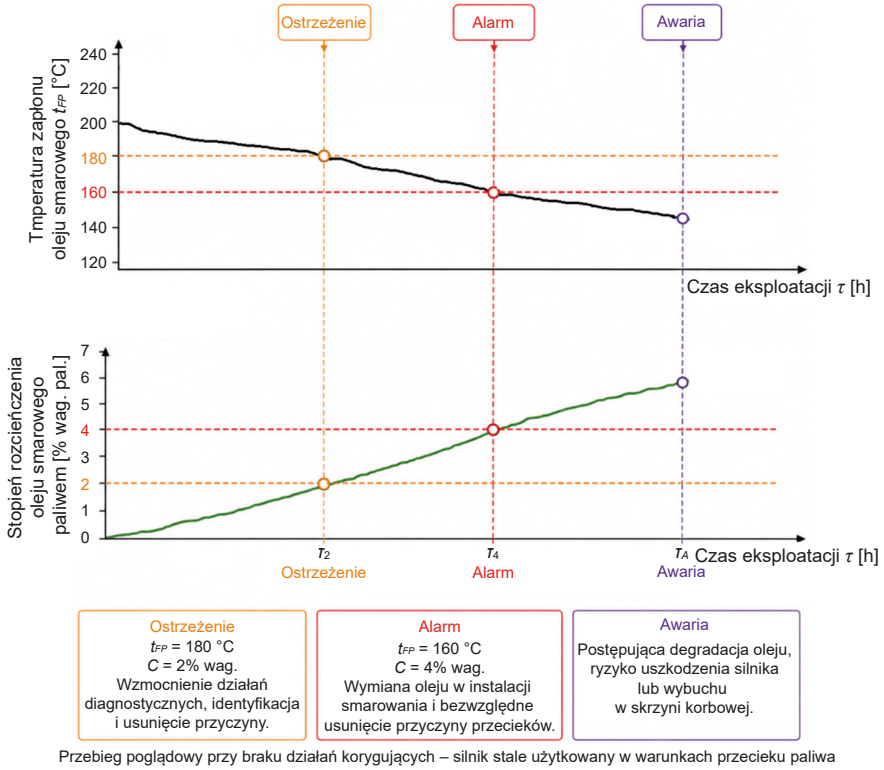
Ponieważ wymienieni uznani producenci przyjmują minimalną dopuszczalną temperaturę zapłonu na poziomie 180–190 °C, a literatura wskazuje, że temperatura zapłonu nie powinna spadać poniżej około 180 °C, za uzasadnione przyjęto wartość 180 °C jako próg ostrzegawczy.

Osiągnięcie wartości ostrzegawczej oznacza konieczność wzmożonego nadzoru nad stanem oleju smarowego oraz identyfikacji przyczyn przedostawania się paliwa do układu smarowania.

Uwzględniając zależność pomiędzy wzrostem zawartości paliwa w oleju smarowym a obniżeniem jego temperatury zapłonu, a także fakt, że zawartość oleju napędowego na poziomie 2–5% wag. jest już wskazywana w literaturze jako potencjalnie niebezpieczna dla poprawnej eksploatacji silnika, za wartość ostrzegawczą stężenia oleju napędowego w oleju smarowym przyjęto 2% wag. Wartość ta odpowiada dolnej granicy zakresu uznawanego za mogący powodować pogorszenie właściwości użytkowych oleju. Jednocześnie jako wartość alarmową przyjęto 4% wag., która znajduje się w górnej części przedziału zagrożenia wskazywanego przez autorów oraz zapewnia odpowiedni margines bezpieczeństwa względem poziomu 8% wag., przy którym według firmy Castrol może wystąpić ryzyko wybuchu w skrzyni korbowej.

Mając na uwadze przedstawione przesłanki, w dalszej części pracy przyjęto następujące wartości progowe wykorzystywane do oceny stopnia rozcieńczenia oleju smarowego paliwem: temperaturę zapłonu równą 180 °C jako wartość ostrzegawczą oraz 160 °C jako wartość alarmową, natomiast zawartość oleju napędowego w oleju smarowym równą 2% wag. jako wartość ostrzegawczą i 4% wag. jako wartość alarmową. Zobrazowano to poglądowo na rysunku 3.5. Należy zauważyć, że w literaturze można spotykać inne od przyjętych wartości

graniczne zawartości oleju napędowego w oleju przyjmowane odpowiednio jako ostrzegawcze lub alarmowe [99], stąd też przyjmując określony zakres poziomów granicznych, należy mieć go na uwadze podczas prowadzenia analizy wyników.



Rys. 3.5. Reprezentacja stanów granicznych oleju smarowego

Dla uproszczenia analizy, z powodów praktycznych okresowe uzupełnienie ilości oleju w instalacji smarowania obiegowego silnika o kilka do kilkunastu litrów wynikające ze występującego w normalnych warunkach eksploatacji silnika bezwodzikowego zużywania się oleju w komorach spalania silnika, nie jest uwzględniane w analizie.

Czas do uzyskania wartości progowej ostrzegawczej τ_2 i alarmowej τ_4 można opisać odpowiednio w postaci:

$$\tau_2 = \tau_{gr}(C = 2\%\ \text{wag.}) \tag{3.21}$$

$$\tau_4 = \tau_{gr}(C = 4\%\ \text{wag.}) \tag{3.22}$$

gdzie: τ_{gr} – czas użytkowania oleju do chwili osiągnięcia wartości progowej stopnia rozcieńczenia C oleju smarowego olejem napędowym.

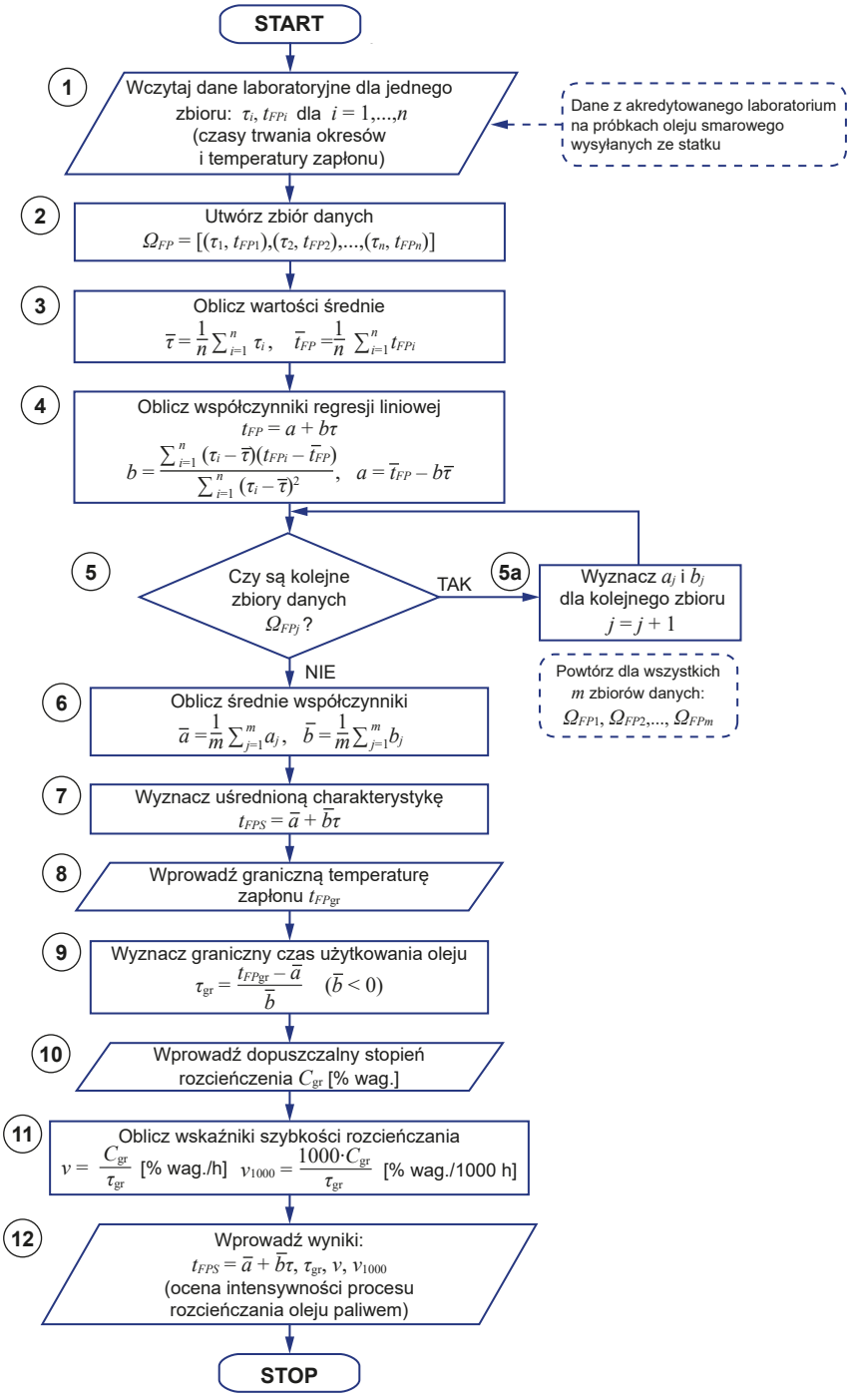
W zaproponowanej przez autora metodzie przyjęto wskazane powyżej wartości graniczne oparte na rekomendacjach literaturowych producentów silników okrętowych oraz producentów silnikowych olejów smarowych. Rekomendacje te mają charakter empiryczny i wynikają z doświadczenia eksploatacyjnego podmiotów wydających te rekomendacje, a nie z wyprowadzonych zależności analitycznych. Należy więc mieć na uwadze, że zawartość oleju napędowego w oleju smarowym na poziomie 2% wag. niekoniecznie musi odpowiadać temperaturze zapłonu takiej mieszaniny wynoszącej 180 °C, zaś zawartość 4% wag. oleju napędowego w oleju smarowym temperaturze 160 °C. Różnice temperatury zapłonu dla określonej mieszaniny oleju napędowego z olejem napędowym w znanych udziałach masowych składników wynikają każdorazowo ze składu i właściwości fizykochemicznych zarówno oleju smarowego oraz oleju napędowego wykorzystywanych w danym silniku, a także warunków eksploatacji (zanieczyszczenia, starzenie oleju itp.) [100]. Nie ma to jednak istotnego wpływu na samą możliwość wykorzystania zaproponowanej metody przy założeniu zachowania analogicznych poziomów granicznych dla kolejnych pomiarów i uwzględnienie założeń do analizy na etapie opracowywania wyników.

Osiągnięcie poziomu ostrzegawczego powinno skutkować intensyfikacją działań diagnostycznych oraz koniecznością identyfikacji i usunięcia przyczyny przedostawania się paliwa do układu smarowania. Z kolei osiągnięcie poziomu alarmowego należy traktować jako stan krytyczny, wymagający natychmiastowej wymiany oleju w instalacji smarowania oraz bezwzględnego usunięcia źródła przecieków paliwa, w celu zapobieżenia dalszej degradacji właściwości eksploatacyjnych oleju oraz ograniczenia ryzyka uszkodzenia silnika, którego awaria wystąpi w przypadku braku podjęcia działań prewencyjnych w chwili τ_A.

3.4. Algorytm ogólny metody

Na podstawie założeń przedstawionych w podrozdziałach 3.1–3.3 oraz etapów postępowania w ramach zaproponowanej metody opracowano skonsolidowany, ogólny schemat postępowania. Zobrazowano go z wykorzystaniem schematu algorytmu wykonanego zgodnie ze standardem ISO 5807:1985 [101] i pokazanego na rysunku 3.6.

Przedstawiony algorytm umożliwia zautomatyzowanie procesu obróbki informacji i wykonanie oprogramowania dla komputerów osobistych lub aplikacji do wykorzystania w urządzeniach mobilnych. Zagadnienia te mogą stanowić przedmiot dalszych prac rozwojowych i wdrożeniowych związanych z zaproponowaną nowatorską metodą.



Rys. 3.6. Algorytmiczna reprezentacja zaproponowanej metody MORSO oceny szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem

3.5. Warianty realizacji układu diagnostycznego

3.5.1. Założenia wstępne dla układu diagnostycznego

Metoda przedstawiona w podrozdziałach 3.1–3.3 została zgłoszona przez autora do ochrony patentowej jako zasadniczy komponent wynalazku (zgłoszenie patentowe nr P.457342 z dnia 14 października 2026 – załącznik Z8).

Wynalazek dotyczy analityczno-predykcyjnej metody MORSO oraz układu do oceny stanu oleju smarowego w silnikach spalinowych, w szczególności okrętowych silnikach tłokowych z obiegowym układem smarowania, w zakresie identyfikacji i prognozowania stopnia oraz szybkości jego rozcieńczania paliwem.

Istota wynalazku polega na przetwarzaniu danych pochodzących z okresowych badań laboratoryjnych oleju smarowego wykonywanych na próbkach pobieranych z eksploatowanego silnika zgodnie z przyjętym harmonogramem serwisowym, przy czym kluczowym parametrem diagnostycznym jest temperatura zapłonu oleju smarowego, której zmiany w czasie eksploatacji są wykorzystywane jako wskaźnik postępującego rozcieńczania oleju paliwem.

Sposób (metoda) w systemie przetwarzania danych realizuje następujące etapy:

- pozyskanie oraz uporządkowanie sekwencji danych eksploatacyjnych obejmujących czasy kolejnych okresów pracy silnika oraz odpowiadające im wyniki laboratoryjne temperatury zapłonu oleju smarowego;
- weryfikację kompletności oraz chronologii danych oraz eliminację danych niezgodnych z przebiegiem eksploatacyjnym, w szczególności wynikających z wymiany lub odświeżenia oleju;
- segmentację danych na spójne okresy eksploatacji oleju, odpowiadające rzeczywistym cyklom jego użytkowania w silniku;
- wyznaczenie dla każdego okresu eksploatacyjnego parametru opisującego trend zmian temperatury zapłonu w funkcji czasu pracy silnika;
- agregację wyników z wielu okresów eksploatacyjnych lub wielu jednostek silnikowych w celu uzyskania uśrednionej charakterystyki degradacji oleju;
- wyznaczenie czasu eksploatacji, po którym prognozowana temperatura zapłonu osiąga wartość progową wymaganą przez producenta oleju lub silnika, stanowiącą kryterium jego wymiany;
- wyznaczenie wskaźnika szybkości rozcieńczania oleju paliwem na podstawie relacji pomiędzy dopuszczalnym poziomem rozcieńczenia a prognozowanym czasem osiągnięcia stanu granicznego.

Układ realizujący metodę obejmuje:

- interfejs wejściowy do odbioru danych laboratoryjnych dotyczących temperatury zapłonu oleju oraz danych eksploatacyjnych dotyczących czasu pracy silnika;

- moduł przetwarzania danych skonfigurowany do ich walidacji, porządkowania oraz segmentacji według okresów eksploatacji oleju;
- moduł analizy trendu skonfigurowany do wyznaczania zmian właściwości oleju w funkcji czasu pracy silnika;
- moduł agregacji danych skonfigurowany do łączenia wyników z wielu okresów eksploatacyjnych w jedną charakterystykę diagnostyczną;
- moduł predykcyjny skonfigurowany do wyznaczania przewidywanego czasu osiągnięcia stanu granicznego oleju oraz do obliczania wskaźnika intensywności jego rozcieńczania paliwem.

Układ diagnostyczny jest skonfigurowany do pracy w trybie ciągłym, w którym kolejne wyniki badań laboratoryjnych są automatycznie włączane do modelu diagnostycznego, powodując jego bieżącą aktualizację oraz korektę prognozy pozostałego czasu bezpiecznej eksploatacji oleju.

Układ i metoda zapewniają efekt techniczny w postaci możliwości bieżącej, ilościowej oceny stopnia rozcieńczenia oleju smarowego paliwem oraz prognozowania momentu jego wymiany w oparciu o rzeczywiste dane eksploatacyjne, przy jednoczesnym ograniczeniu wpływu zakłóceń wynikających z cyklicznych wymian oleju i nieciągłości pomiarowych.

3.5.2. Klasyczny model regresyjny w architekturze klient–serwer

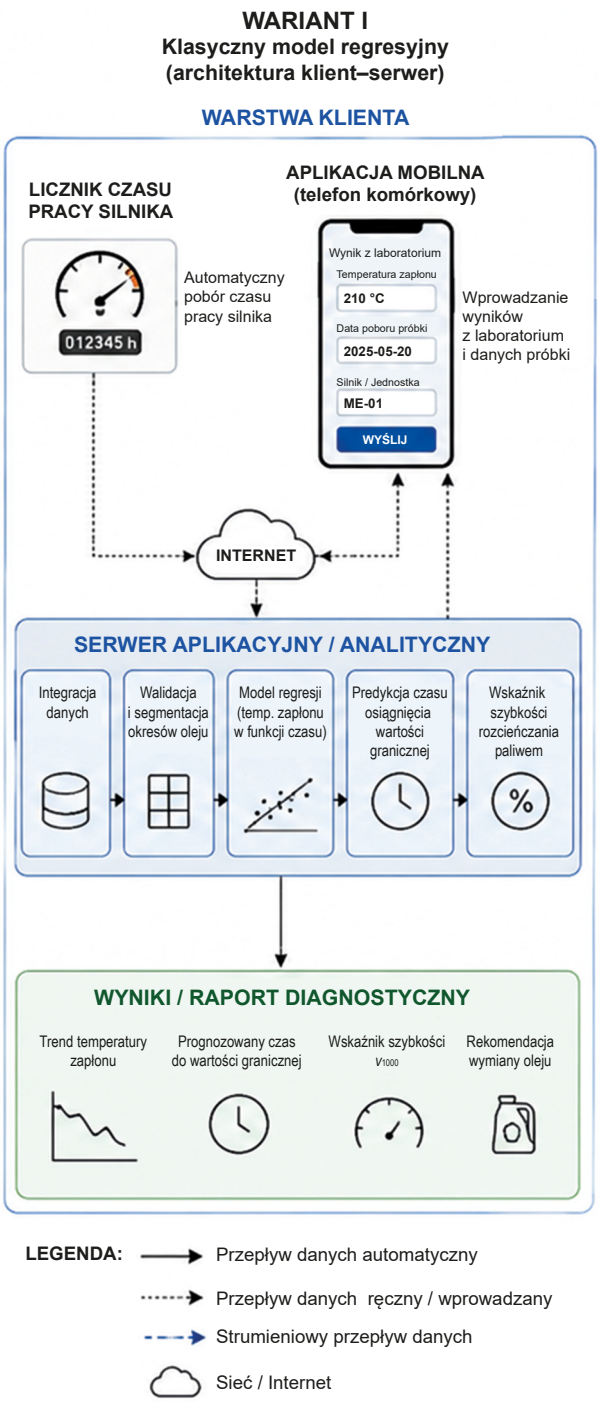
W tym wariancie sposób realizacji wynalazku wykonywany jest w systemie opartym o architekturę klient–serwer, w której serwer realizuje przetwarzanie analityczne, natomiast urządzenia klienckie odpowiadają za pozyskiwanie i wprowadzanie danych (rys. 3.7).

Dane dotyczące czasu pracy silnika są automatycznie pobierane z licznika czasu pracy silnika (ang. *engine hour meter*) i przesyłane do serwera w sposób cykliczny lub zdarzeniowy.

Dane laboratoryjne dotyczące temperatury zapłonu oleju smarowego są wprowadzane przez użytkownika za pomocą aplikacji uruchomionej na urządzeniu mobilnym, w szczególności telefonie komórkowym, wyposażonym w interfejs umożliwiający ręczne lub półautomatyczne wprowadzenie wyników badań laboratoryjnych wraz z identyfikacją próbki i czasem jej poboru.

Serwer wykonuje następujące operacje:

- synchronizacja danych czasu pracy silnika z danymi laboratoryjnymi,
- segmentacja okresów eksploatacyjnych oleju,
- wyznaczenie modelu regresji zmian temperatury zapłonu w funkcji czasu,
- obliczenie przewidywanego czasu osiągnięcia wartości progowej (ostrzegawczej i alarmowej),
- wyznaczenie wskaźnika szybkości rozcieńczania paliwem.



Rys. 3.7. Wariant I realizacji systemu diagnostycznego oparty o klasyczny model regresyjny w architekturze klient–serwer

Wyniki analizy w postaci przewidywanego czasu osiągnięcia wartości progowej oraz wskaźnika szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem są zwracane do aplikacji mobilnej w formie raportu diagnostycznego.

3.5.3. Model adaptacyjny z przetwarzaniem strumieniowym

W tym wariancie układ diagnostyczny zrealizowany jest w architekturze klient–serwer z ciągłą wymianą danych w trybie strumieniowym (ang. *real-time client–server*). Układ przedstawiono na rysunku 3.8.

Czas pracy silnika jest pozyskiwany automatycznie z licznika czasu pracy i przesyłany w sposób ciągły do serwera diagnostycznego, który utrzymuje aktualny stan modelu degradacji oleju.

Dane laboratoryjne wprowadzane są przez użytkownika za pomocą aplikacji mobilnej, która umożliwia natychmiastowe dodanie wyników pomiarów temperatury zapłonu po ich uzyskaniu z laboratorium, wraz z oznaczeniem czasu pobrania próbki oraz identyfikatorem silnika.

Serwer realizuje:

- inkrementalną aktualizację modelu degradacji bez konieczności przeliczania pełnej historii danych,
- bieżącą korektę trendu zmian temperatury zapłonu,
- dynamiczną aktualizację prognozy czasu osiągnięcia wartości granicznej,
- ciągłe wyznaczanie aktualnej estymacji intensywności rozcieńczania paliwem.

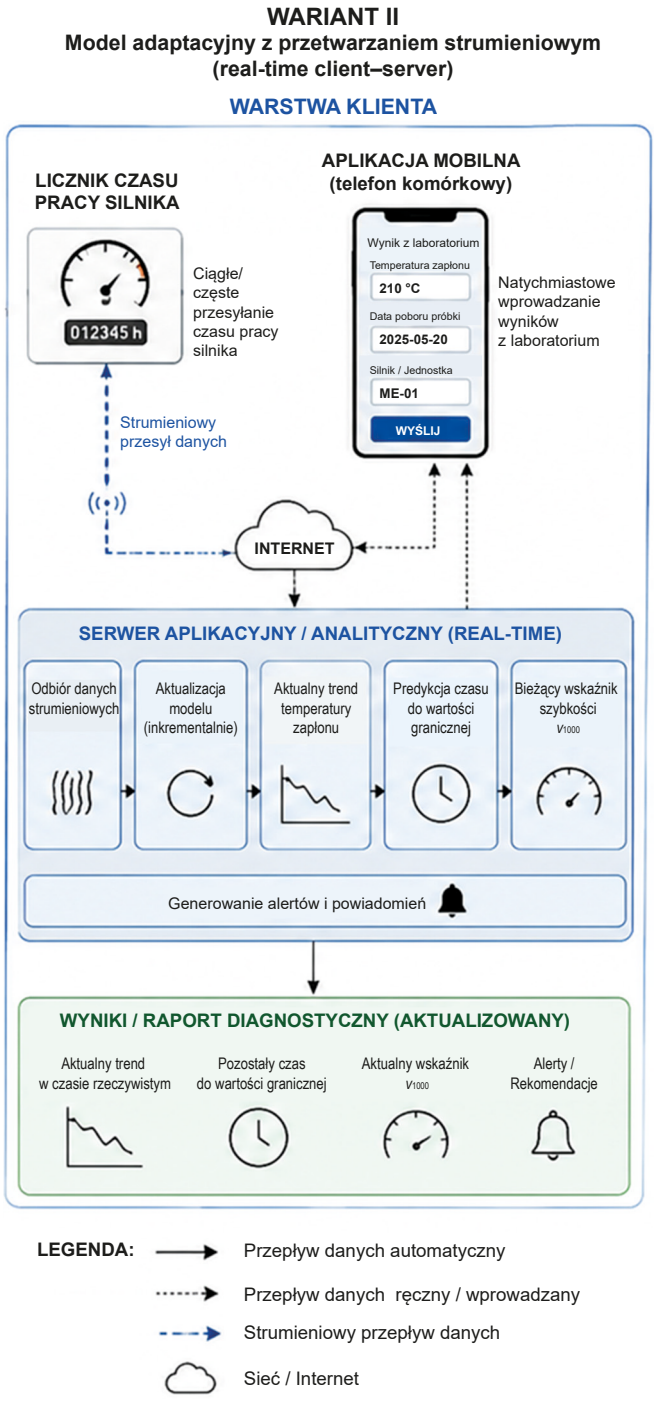
System generuje automatyczne powiadomienia w przypadku zbliżania się do wartości progowej. Proces obróbki danych może przebiegać wg algorytmu jak w wariancie I.

3.5.4. System wielosilnikowy z centralnym serwerem

W tym wariancie sposób realizowany jest w rozproszonej architekturze klient–serwer obejmującej wiele jednostek silnikowych.

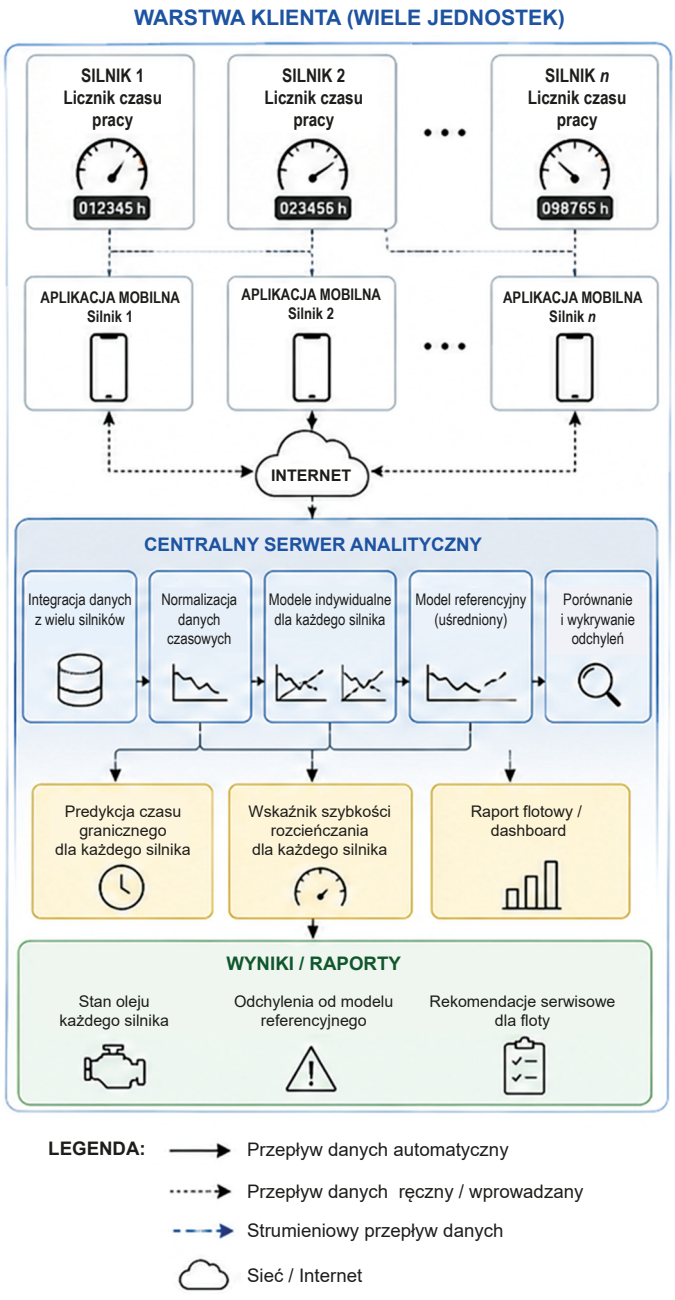
Każdy silnik wyposażony jest w licznik czasu pracy, z którego dane są automatycznie przesyłane do centralnego serwera analitycznego, przy czym dane te stanowią podstawę synchronizacji osi czasu dla wszystkich pomiarów laboratoryjnych (rys. 3.9).

Dane laboratoryjne dotyczące temperatury zapłonu oleju smarowego wprowadzane są przez użytkowników za pomocą aplikacji mobilnej, działającej jako klient systemu, umożliwiającej przypisanie wyniku badania do konkretnego silnika oraz konkretnego momentu poboru próbki.



Rys. 3.8. Wariant II realizacji systemu diagnostycznego oparty o model adaptacyjny z przetwarzaniem strumieniowym

WARIANT III
System wielosilnikowy z centralnym serwerem analitycznym (architektura klient–serwer)



Rys. 3.9. Wariant III realizacji systemu diagnostycznego jako system wielosilnikowy z centralnym serwerem analitycznym i mobilnym pozyskiwaniem danych

Serwer centralny:

- integruje dane z wielu silników i wielu jednostek eksploatacyjnych,
- dokonuje normalizacji danych czasowych i eksploatacyjnych,
- tworzy indywidualne modele degradacji dla każdego silnika,
- generuje uśredniony model referencyjny dla danej floty lub klasy silników,
- porównuje parametry jednostkowe z modelem referencyjnym w celu identyfikacji anomalii.

Na podstawie tych danych wyznaczany jest indywidualny oraz flotowy czas osiągnięcia wartości granicznej oraz wskaźnik intensywności rozcieńczania paliwem.

System umożliwia centralne monitorowanie stanu oleju smarowego w silnikach eksploatowanych we flocie, w szczególności ocenę stopnia jego rozcieńczenia paliwem oraz wykrywanie odchyleń od przyjętych warunków eksploatacji. Zaproponowane rozwiązanie może stanowić element systemu wspomagającego diagnostykę silników lub zostać zintegrowane z systemem planowanego utrzymania ruchu (PMS). Proces obróbki danych może przebiegać wg algorytmu przedstawionego w podrozdziale 3.4.

To co wiemy to tylko kropelka.
Czego nie wiemy to cały ocean.
Isaak Newton (4.1.1643 – 31.3.1727)

Ludzie mają zbyt mało czasu, aby cokolwiek poznać.
Antoine de Saint-Exupéry (29.6.1900 – 31.7.1944)

4. EGZEMPLIFIKACJA METODY MORSO

4.1. Przedmiot i cel analizy

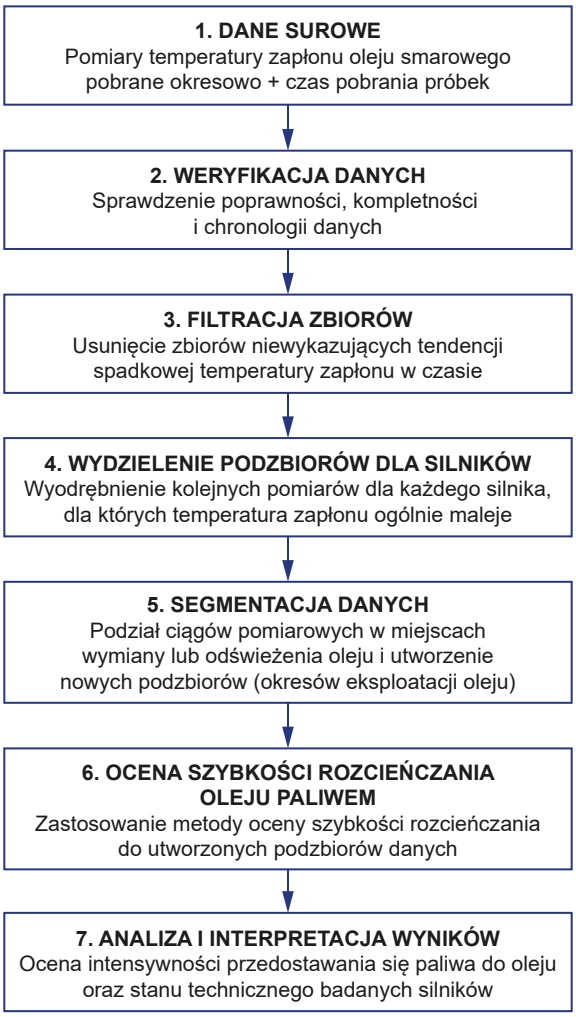
Zaproponowana i przedstawiona w rozdziale 3 metoda badawcza została przetestowana z wykorzystaniem danych pochodzących z eksploatacji silników okrętowych do oceny szybkości rozcieńczania oleju paliwem w przypadkach, gdzie obserwowany jest spadek temperatury zapłonu próbek oleju. Ogólny zaadoptowany w niniejszej pracy schemat przetwarzania danych laboratoryjnych o temperaturze zapłonu oleju smarowego pokazano na rysunku 4.1.

Przygotowanie danych do oceny szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem obejmowało kilka kolejnych etapów, których celem było wyodrębnienie zbiorów pomiarowych zawierających informacje diagnostycznie istotne. Punktem wyjścia były surowe dane obejmujące wyniki pomiarów temperatury zapłonu próbek oleju smarowego pobieranych okresowo z eksploatowanych silników wraz z informacją o czasie pobrania próbki.

Następnie przeprowadzono proces selekcji danych, eliminując z dalszej analizy zbiory niewykazujące charakterystycznej zmienności temperatury zapłonu związanej z postępującym rozcieńczaniem oleju paliwem. Brak takiej zmienności mógł wynikać z odświeżania lub wymiany oleju, bardzo dobrego stanu technicznego silnika ograniczającego przedostawanie się paliwa do oleju, a także z błędów lub nieprawidłowości w procesie pobierania próbek. Każdorazowo jako kolejny zbiór danych przyjmowano standardowo zbiór zaczynający się wyjściowo od temperatury zapłonu świeżego oleju $t_{FP}(\tau = 0) \pm 10$ °C albo biorąc pod uwagę zauważalny wzrost temperatury zapłonu oleju świadczący o odświeżeniu oleju smarowego w instalacji smarowania obiegowego silnika (uzupełnieniu instalacji znaczną ilością oleju świeżego).

Proces przygotowania danych obejmował następujące kroki:

1. Zgromadzenie i uporządkowanie surowych danych pomiarowych temperatury zapłonu oleju smarowego wraz z informacją o czasie pobrania próbek.
2. Weryfikację poprawności, kompletności oraz chronologii zgromadzonych danych.



Rys. 4.1. Przyjęty sposób przetwarzania danych laboratoryjnych

3. Odfiltrowanie zbiorów niewykazujących tendencji spadkowej temperatury zapłonu w czasie, charakterystycznej dla procesu rozcieńczania oleju paliwem.
4. Wyodrębnienie dla każdego silnika podzbiorów obejmujących kolejne pomiary, dla których temperatura zapłonu wykazywała ogólnie malejący przebieg.
5. Rozdzielenie ciągów pomiarowych w miejscach wskazujących na odświeżenie lub wymianę oleju oraz utworzenie nowych podzbiorów danych odpowiadających kolejnym okresom eksploatacji oleju.
6. Zastosowanie do utworzonych podzbiorów metody MORSO oceny szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem.

7. Analizę i interpretację uzyskanych wyników w kontekście intensywności przedostawania się paliwa do oleju smarowego oraz stanu technicznego badanych silników.

Tak przygotowany zbiór danych umożliwia przeprowadzenie analizy na podstawie przebiegów pomiarowych odzwierciedlających rzeczywisty proces rozcieńczania oleju paliwem, przy jednoczesnym ograniczeniu wpływu czynników mogących prowadzić do błędnej interpretacji wyników.

4.2. Dane badawcze

4.2.1. Obiekt badań

Zaproponowaną metodę wykorzystano do analizy danych o temperaturze zapłonu olejów smarowych ze statków należących do floty masowców Polskiej Żeglugi Morskiej zebranych w latach 1990–2002 i opracowanych przez dr. Jana Krupowiesa [37, 68] (patrz załącznik Z1).

Dane wykorzystane w analizie metody MORSO pochodzą z badań eksploatacyjnych prowadzonych na okrętowych silnikach spalinowych. Pomimo że nie należą one do najnowszych, ich zastosowanie jest w pełni uzasadnione ze względu na bardzo dobrą dokumentację przebiegu eksploatacji oraz obszerny zbiór wyników pomiarów temperatury zapłonu olejów smarowych eksploatowanych w silnikach armatora. Zgromadzony materiał badawczy obejmuje rzeczywiste warunki pracy jednostek pływających i stanowi wartościową podstawę do analizy zależności pomiędzy procesem rozcieńczania oleju paliwem a zmierzoną temperaturą zapłonu oleju smarowego.

Należy jednak uwzględnić, że od momentu pozyskania analizowanych danych nastąpiły istotne zmiany technologiczne dotyczące zarówno paliw, jak i olejów smarowych stosowanych w silnikach spalinowych. Współczesne paliwa, w tym paliwa o obniżonej zawartości siarki (VLSF i ULSF), paliwa syntetyczne, biopaliwa (HVO) oraz paliwa zawierające biokomponenty (FAME), charakteryzują się odmiennym składem chemicznym, zakresem temperatur wrzenia oraz właściwościami fizykochemicznymi w porównaniu z paliwami stosowanymi w okresie pozyskania danych. Równocześnie rozwój technologii środków smarowych doprowadził do stosowania nowoczesnych olejów bazowych oraz zaawansowanych pakietów dodatków uszlachetniających, które mogą wpływać na przebieg procesów degradacji oleju podczas eksploatacji.

Zmiany właściwości współczesnych paliw i olejów mogą mieć wpływ na ilościową interpretację wyników uzyskiwanych metodą MORSO. W szczególności skład frakcyjny paliwa, jego prężność par oraz udział składników o podwyższonej lotności mogą wpływać na zależność pomiędzy rzeczywistym stopniem

Tabela 4.1. Podstawowe dane statków, których silniki były poddane analizie (opracowano na podstawie bazy Sea-web Ships [102])

Statek (nr IMO)	Długość całkowita *LOA* [m]	Długość między pionami *LBP* [m]	Szerokość maksymalna *BE* [m]	Zanurzenie *D* [m]	Wysokość całkowita *KTMH* [m]	Nośność statku *DWT* [t]	Pojemność brutto *GT* [–]	Pojemność netto *NT* [–]
Generał Bem (7346611)	201,170	186,010	27,870	11,231	B.d.	37 844	23 427	14 321
Generał Jasiński (7358066)	201,200	186,010	27,870	11,231	B.d.	37 764	23 427	14 231
Generał Madaliński (7358078)	201,230	192,340	27,870	11,231	B.d.	37 844	23 425	14 231
Goleniów (7725611)	97,990	94,980	14,640	6,071	37,000	4449	3127	1596
Kopalnia Gottwald (7725738)	158,730	149,990	22,050	8,383	41,700	16 733	11 632	5695
Kopalnia Machów (7104958)	144,910	136,000	20,710	8,316	B.d.	14 036	8107	4478
Mirosławiec (7414999)	199,120	183,950	24,440	11,010	B.d.	33 450	20 593	12 728
Pomorze Zachodnie (8207783)	180,250	172,020	23,140	9,848	B.d.	26 696	16 697	9015
Powstaniec Styczniowy (8313960)	185,530	195,360	25,350	10,672	48,600	33 780	21 531	12 316
Powstaniec Warszawski (7637864)	198,870	198,330	24,440	10,891	B.d.	33 460	24 260	12 890
Studzianki (7405534)	199,940	184,140	24,460	10,990	B.d.	33 450	20 286	12 604
Syn Pułku (7362691)	199,940	184,140	24,440	10,630	B.d.	31 910	20 286	11 428
Uniwersytet Jagielloński (7121293)	218,850	205,260	30,560	12,100	B.d.	52 000	29 852	19 015
Uniwersytet Warszawski (7346908)	218,830	205,260	30,560	12,070	B.d.	52 020	29 888	18 970
Uniwersytet Wrocławski (7358523)	218,780	205,260	30,560	11,710	B.d.	49 950	29 888	18 951
Wyszków (7725532)	95,050	87,990	14,640	6,060	37,000	4378	3127	1596
Zgorzelec (7725518)	97,750	87,990	14,640	6,001	37,000	4412	3127	1596
Ziemia Chełmińska (8207769)	180,250	172,020	23,140	9,851	B.d.	26 700	16 699	9021

rozcieńczenia oleju paliwem a zmierzoną temperaturą zapłonu oleju smarowego. Dodatkowym czynnikiem wymagającym uwzględnienia jest możliwość odparowania lekkich frakcji paliwa z gorącego oleju podczas długotrwałej pracy silnika przy wysokim obciążeniu cieplnym, co może prowadzić do częściowego zaniżenia wartości rozcieńczenia wyznaczonego na podstawie temperatury zapłonu oleju.

Z tego względu wykorzystany zbiór danych należy traktować jako materiał referencyjny umożliwiający opracowanie, weryfikację i ocenę założeń metody MORSO, a nie jako bezpośrednią reprezentację wszystkich współczesnych paliw i olejów smarowych stosowanych w eksploatacji silników okrętowych. Wykorzystanie metody w odniesieniu do nowych generacji paliw, w szczególności paliw zawierających biokomponenty oraz paliw alternatywnych, wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań walidacyjnych. Badania te powinny umożliwić określenie wpływu aktualnych formulacji paliw i olejów na zależność pomiędzy stopniem rozcieńczenia oleju paliwem a zmianą temperatury zapłonu oleju smarowego oraz pozwolić na dalsze doskonalenie metody MORSO.

Analizie poddano zbiór danych zawierający wartości temperatury zapłonu próbek oleju smarowego pobranego z silników głównych i pomocniczych wymienionego armatora w podanym okresie eksploatacji statków. Wykorzystano 26 zestawów danych pomiarowych z 18 masowców. Zestawienie głównych informacji o tych statkach umieszczono w tabeli 4.1.

Zasadnicze dane techniczno-ruchowe okrętowych silników głównych i pomocniczych, z których instalacji smarowania obiegowego pobierane były badane próbki oleju smarowego przedstawiono w tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Podstawowe dane badanych silników, których silniki były poddane analizie (opracowano na podstawie bazy Sea-web Ships [102])

Licencjodawca	Typ silnika	Przeznaczenie	Liczba badanych silników	Liczba cylindrów i_{cyl} [–]	Średnica cylindra D_{cyl} [m]	Skok tłoka S [m]	Moc znamionowa P_e [kW]
MAN / B&W	5T23LH4	Silnik pomocniczy	2	5	0,20	0,30	
	6T23 H		3	6	0,20	0,30	528
	6T23HH		2	6	0,20	0,30	528
	6T23 LH		1	6	0,20	0,30	488
Sulzer / Wärtsilä	5 A 25/30		7	5	0,25	0,30	540
	5 AL 25/30		5	5	0,25	0,30	504
	6 AL 20/24		2	6	0,25	0,24	500–640
	414 TK		1	8	0,14	0,24	320
	ZL 40/48	Silnik główny	3	6	0,40	0,48	2207–3200

Dane przedstawione w postaci tabelarycznej w wymienionych publikacjach stanowią jeden z najbardziej kompletnych i szczegółowo opracowanych materiałów dostępnych autorowi w literaturze przedmiotu, co było główną przesłanką ich wykorzystania w niniejszej pracy. Dodatkowym argumentem przemawiającym za ich użyciem jest fakt, że silniki o analogicznej konstrukcji są nadal eksploatowane, dzięki czemu uzyskane wyniki zachowują swoją wartość poznawczą i praktyczną.

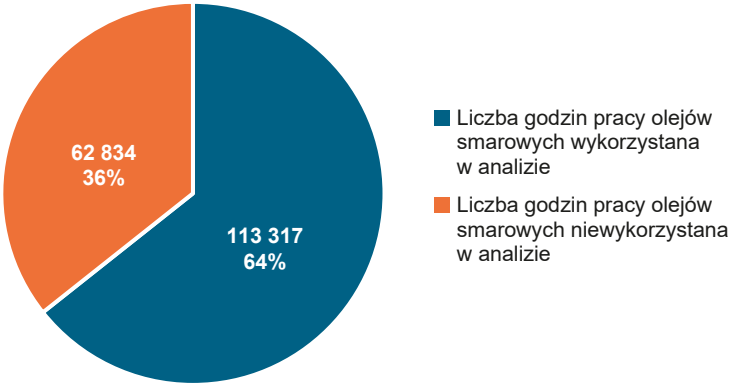
4.2.2. Zestawienie ogólne danych

Dane pomiarowe o temperaturze zapłonu oleju smarowego w tyglu zamkniętym pozyskane z 26 statków zostały wykorzystane do opracowania 40 modeli szczegółowych, które były podstawą do uśrednienia i opracowania 26 modeli opisujących szybkość rozcieńczania oleju smarowego w paliwie w trakcie użytkowania każdego z silników.

Zgodnie z założeniami przedstawionymi w podrozdziale 4.1 spośród całkowitej liczby zarejestrowanych godzin pracy badanych olejów smarowych równej 176 151 h, w niniejszej analizie wykorzystano okres sumaryczny użytkowania olejów smarowych równy 113 317 h, dla którego obserwowany był jednoznaczny spadek wartości temperatury zapłonu wraz z czasem użytkowania oleju.

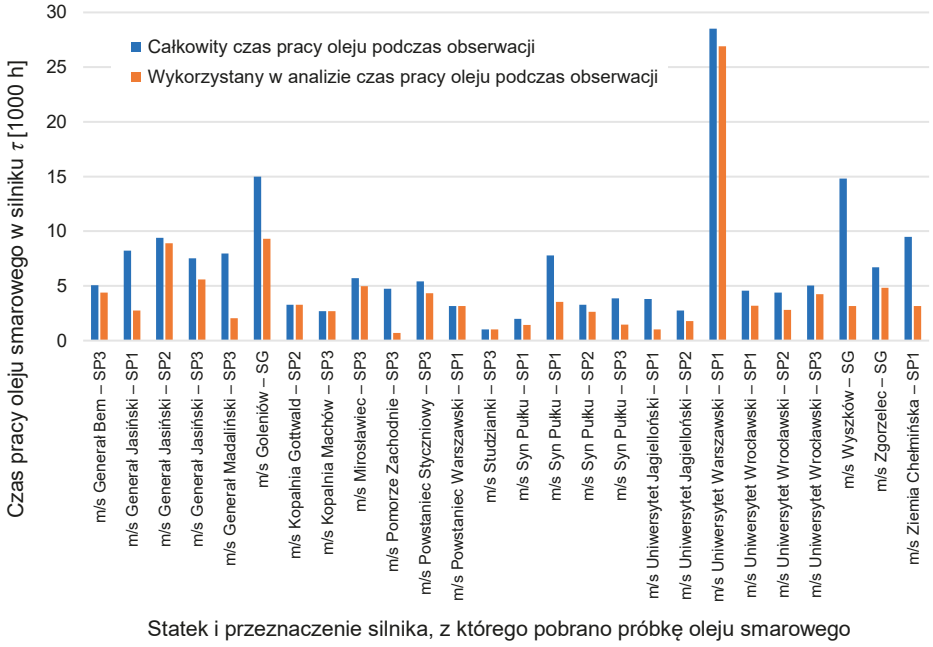
Czas pracy oleju określany jest na podstawie licznika pracy silnika, jest więc wyrażony w roboczogodzinach silnika, a nie jako czas kalendarzowy, a tym samym jego wartość jest mniejsza niż całkowity kalendarzowy czas użytkowania oleju.

W sposób poglądowy udział ten pokazano na wykresie przedstawionym na rysunku 4.2. Jak wynika z wykresu, w przedmiotowej analizie po odfiltrowaniu danych niewykazujących żadnych zmian wartości temperatury zapłonu przy kolejnych pomiarach próbek oleju, wykorzystano 64% całkowitego okresu obserwacji stanu analizowanych olejów.



Rys. 4.2. Czas pracy badanych olejów silnikowych wykorzystany w analizie

Porównanie czasu eksploatacji oleju w całym okresie obserwacji, z uwzględnieniem lokalizacji poszczególnych silników na statkach, przedstawiono na rysunku 4.3. Spośród analizowanych 26 silników 7 jednostek pływających wykazuje wykorzystanie mniej niż 60% czasu użytkowania oleju w przeprowadzonej analizie.

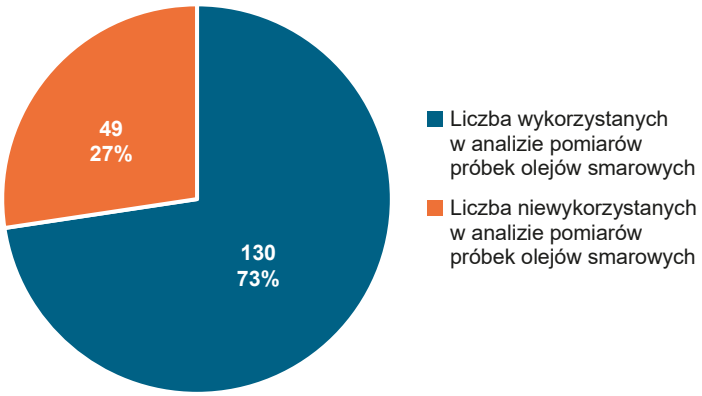


Rys. 4.3. Czas pracy badanych olejów silnikowych wykorzystany w analizie w podziale na lokalizację silnika, z którego pobrano próbkę

W ujęciu szczegółowym największy udział czasu pracy oleju odnotowano dla jednostki m/s Uniwersytet Warszawski – SP1, gdzie wykorzystano 26 898 h z 28 500 h całkowitego czasu pracy, co stanowi jeden z najwyższych poziomów kompletności danych w zbiorze.

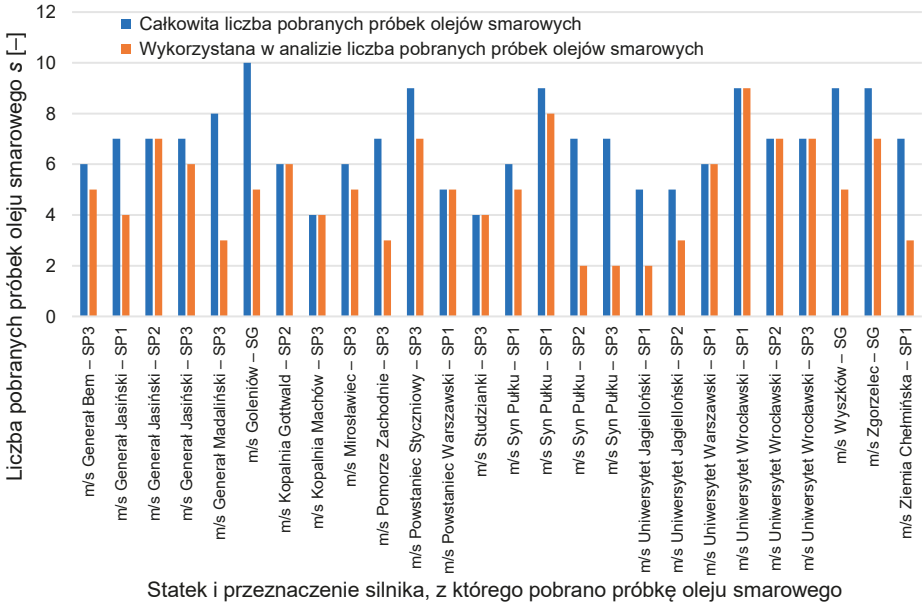
Stosunkowo wysokie wartości czasu pracy oleju w analizie zaobserwowano również dla jednostek m/s Goleniów – SG (9300 h z 14 982 h), m/s Wyszków – SG (3173 h z 14 810 h) oraz m/s Zgorzelec – SG (4830 h z 6695 h), co wskazuje na istotny udział tych jednostek w strukturze zbioru danych. Z kolei najmniejszy udział w analizie odnotowano dla m/s Studzianki – SP3 (1014 h z 1014 h całkowitego czasu), m/s Pomorze Zachodnie – SP3 (711 h z 4752 h) oraz m/s Uniwersytet Jagielloński – SP2 (1771 h z 2751 h), co wskazuje na lokalne ograniczenia dostępności danych pomiarowych.

Na rysunkach 4.4 i 4.5 przedstawiono statystykę danych wykorzystanych w analizie w podziale na liczbę wykorzystanych w analizie próbek olejów.



Rys. 4.4. Liczba próbek badanych olejów silnikowych wykorzystana w analizie

Łącznie do analizy wykorzystano 130 próbek ze 179 pobranych, co potwierdza selektywność zbioru danych wynikającą z przyjętych kryteriów analitycznych.



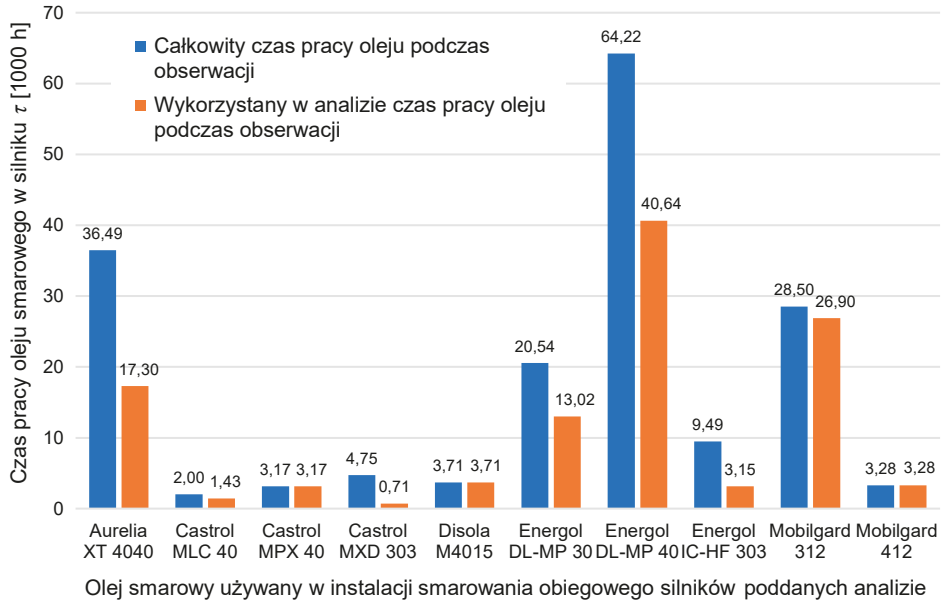
Rys. 4.5. Liczba próbek badanych olejów silnikowych wykorzystana w analizie w podziale na lokalizację silnika, z którego pobrano próbkę

Największą liczbę próbek uwzględniono dla jednostek o wysokim stopniu użytych danych, w tym m/s Uniwersytet Wrocławski – SP1 (9 z 9), m/s Uniwersytet Wrocławski – SP2 (7 z 7), m/s Uniwersytet Wrocławski – SP3 (7 z 7) oraz m/s Kopalnia Gottwald – SP2 (6 z 6), gdzie wszystkie dostępne próbki zostały wykorzystane w analizie.

Stosunkowo wysoki udział próbek odnotowano również dla m/s Goleniów – SG (5 z 10), m/s Wyszków – SG (5 z 9) oraz m/s Syn Pułku – SP1 (8 z 9), co wskazuje na częściowo pełne pokrycie danych pomiarowych. Z kolei najniższy poziom reprezentacji próbek wystąpił w przypadku m/s Uniwersytet Jagielloński – SP1 (2 z 5), m/s Pomorze Zachodnie – SP3 (3 z 7) oraz m/s Syn Pułku – SP2 i SP3 (po 2 z 7), co ogranicza ich wpływ na wyniki analizy w ujęciu lokalnym.

4.2.3. Zestawienie danych w podziale na zastosowany w silniku olej smarowy

W sposób poglądowy rozkład czasu pracy olejów smarowych w zależności od zastosowanego oleju przedstawiono na rysunku 4.6. Szczegółowe informacje producentów olejów dotyczące właściwości fizykochemicznych analizowanych olejów smarowych przedstawiono w załączniku Z2.

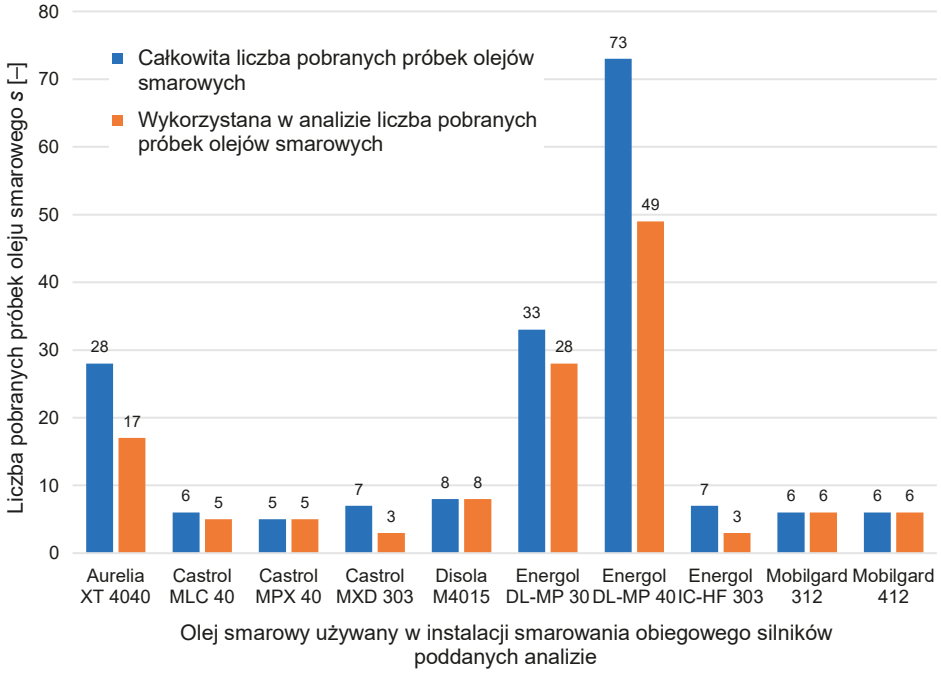


Rys. 4.6. Czas pracy badanych olejów silnikowych wykorzystany w analizie w podziale na oznaczenie handlowe środka smarowego

Największy udział w analizie miał olej Energol DL-MP 40, dla którego wykorzystano 40 635 h z 64 221 h całkowitego czasu pracy, oraz Mobilgard 312, dla którego uwzględniono 26 898 h z 28 500 h.

Jednocześnie najmniejszy udział danych odnotowano dla oleju Castrol MXD 303 (711 h z 4752 h) oraz Castrol MLC 40 (1425 h z 2000 h), co wskazuje na ich marginalne znaczenie w zbiorze analitycznym.

Zestawienie liczby próbek dla poszczególnych olejów przedstawiono na rysunku 4.7.



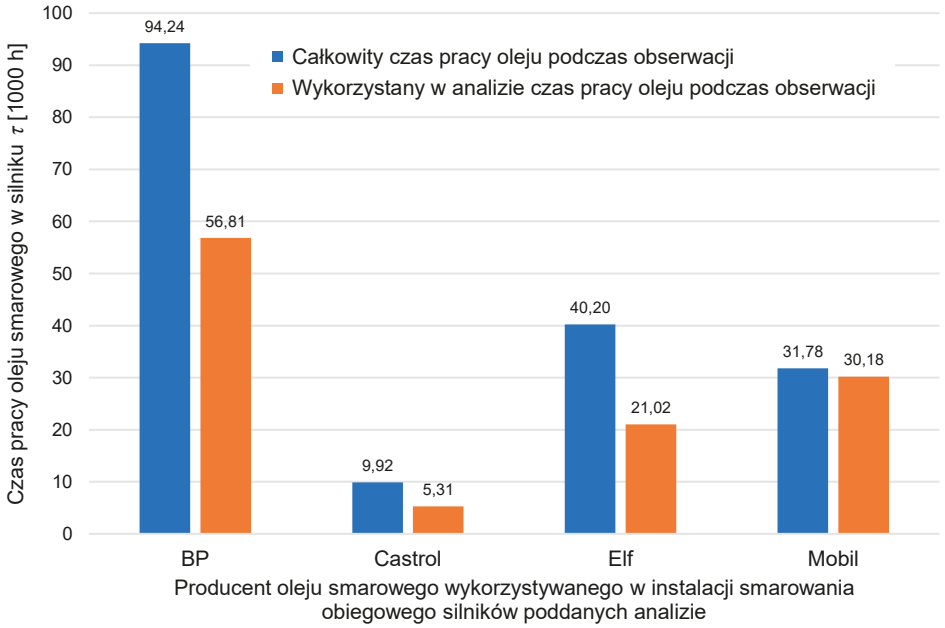
Rys. 4.7. Liczba próbek badanych olejów silnikowych wykorzystana w analizie w podziale na oznaczenie handlowe środka smarowego

Łącznie do analizy wykorzystano 130 próbek ze 179 pobranych. Największy udział próbek odnotowano dla oleju Energol DL-MP 40 (49 z 73) oraz Energol DL-MP 30 (28 z 33), co wskazuje na ich dominację w strukturze danych pomiarowych. Z kolei najmniejszą reprezentację miały oleje Castrol MXD 303 (3 z 7) oraz Energol IC-HF 303 (3 z 7), co ogranicza ich wpływ na wyniki analizy.

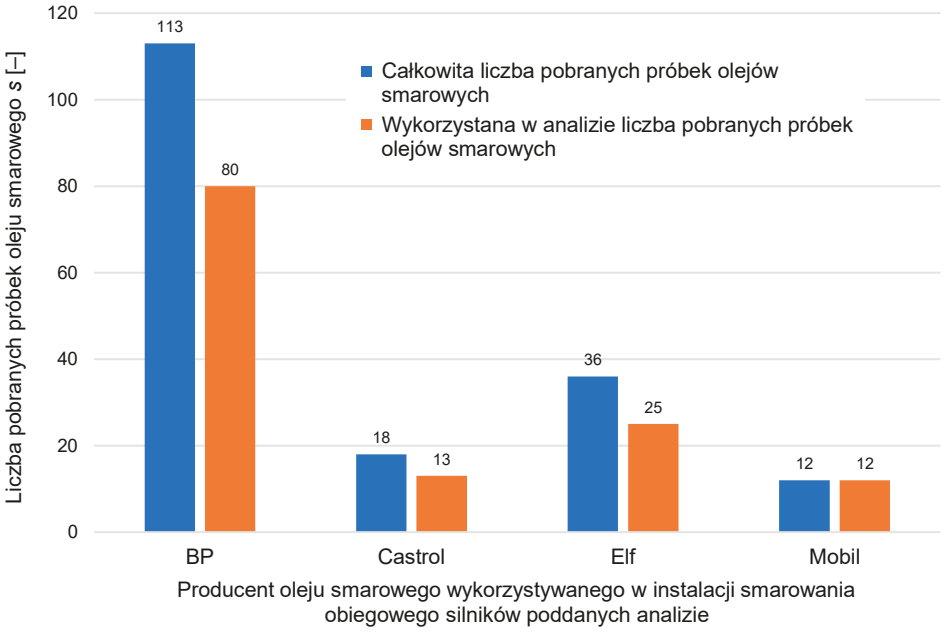
4.2.4. Zestawienie danych w podziale na producenta oleju smarowego

Rozkład danych w zależności od producenta oleju smarowego przedstawiono na rysunkach 4.8 i 4.9.

Całkowity czas pracy olejów od producenta BP wyniósł 94 244 h, z czego w analizie wykorzystano 56 812 h, co stanowi największy udział czasowy wśród producentów. Dla producenta Mobil wartości te wyniosły odpowiednio 31 784 h oraz 30 182 h, co wskazuje na bardzo wysoki poziom wykorzystania danych (ok. 95%). W przypadku Castrol odnotowano 9922 h, z czego 5306 h uwzględniono w analizie, natomiast dla Elf było to 40 201 h oraz 21 017 h.



Rys. 4.8. Czas pracy badanych olejów silnikowych wykorzystany w analizie w podziale na producenta oleju smarowego

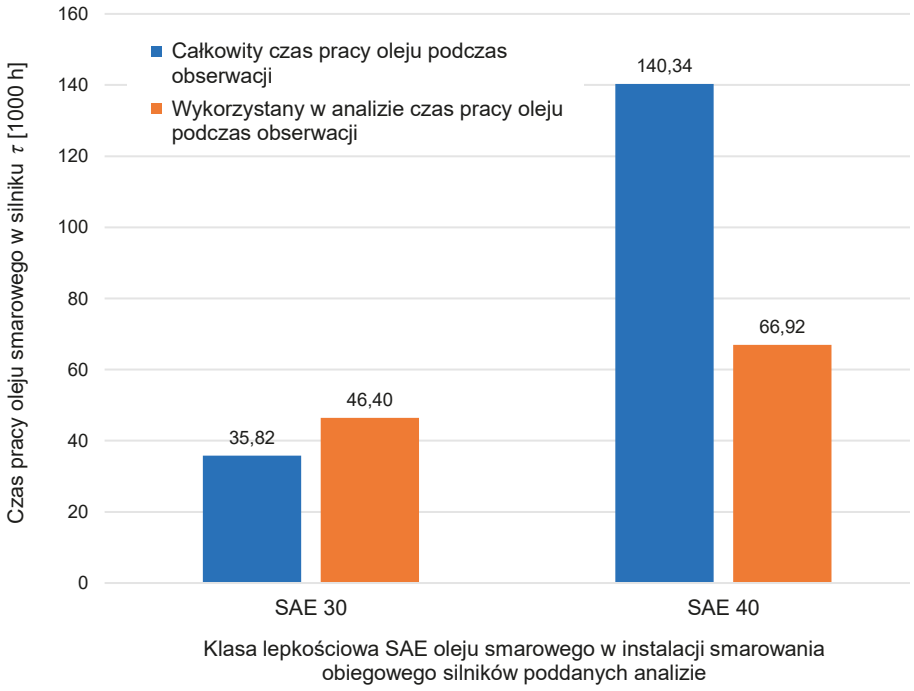


Rys. 4.9. Liczba próbek badanych olejów silnikowych wykorzystana w analizie w podziale na producenta oleju smarowego

W odniesieniu do liczby próbek łącznie wykorzystano 130 próbek ze 179. Największy udział odnotowano dla BP (80 z 113), następnie Elf (25 z 36), Castrol (13 z 18) oraz Mobil (12 z 12), przy czym w przypadku producenta Mobil wszystkie dostępne próbki zostały w pełni uwzględnione w analizie.

4.2.5. Zestawienie danych w podziale na klasę lepkościową SAE oleju smarowego

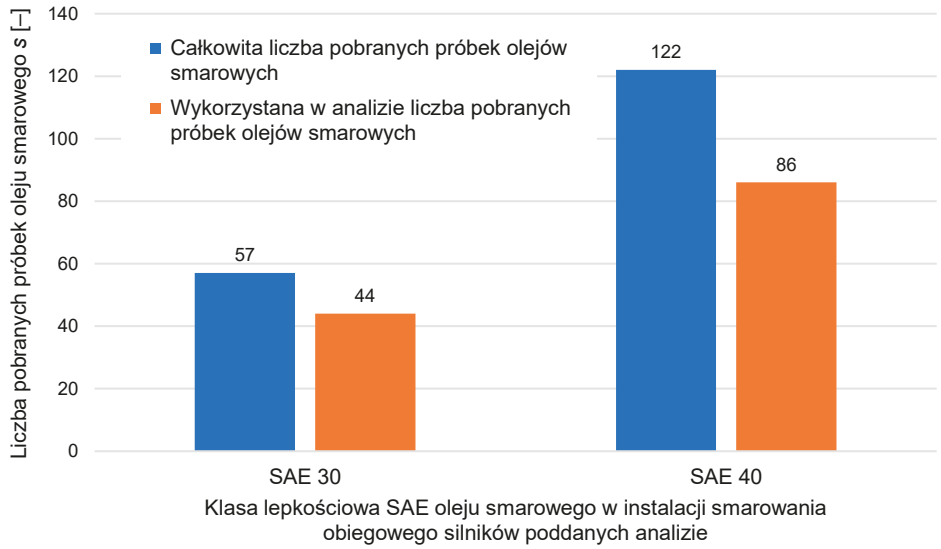
Rozkład danych w zależności od klasy lepkościowej SAE olejów smarowych wykorzystanych w analizie przedstawiono na rysunkach 4.10 i 4.11.



Rys. 4.10. Czas pracy badanych olejów silnikowych wykorzystany w analizie w podziale na klasę lepkościową SAE oleju smarowego

Dla klasy SAE 40 uwzględniono 66 915 h z 140 335 h, natomiast dla SAE 30 było to 46 402 h z 35 816 h. Wskazuje to na dominację klasy SAE 40 w całkowitym czasie eksploatacji, przy jednoczesnym istotnym udziale SAE 30 w danych analitycznych.

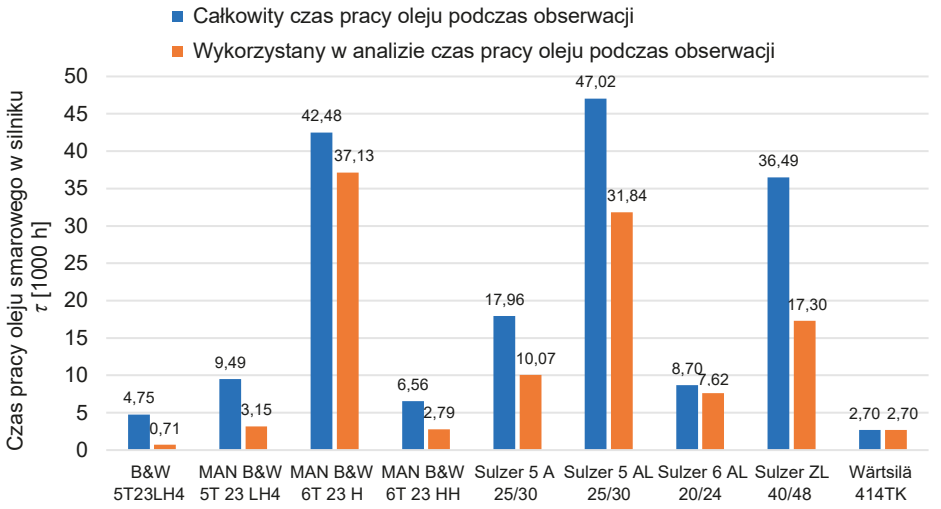
W zakresie liczby próbek dla klasy SAE 40 uwzględniono 86 ze 122 próbek, natomiast dla SAE 30 – 44 z 57 próbek, co potwierdza przewagę klasy SAE 40 w strukturze zbioru danych.



Rys. 4.11. Liczba próbek badanych olejów silnikowych wykorzystana w analizie w podziale na klasę lepkościową SAE oleju smarowego

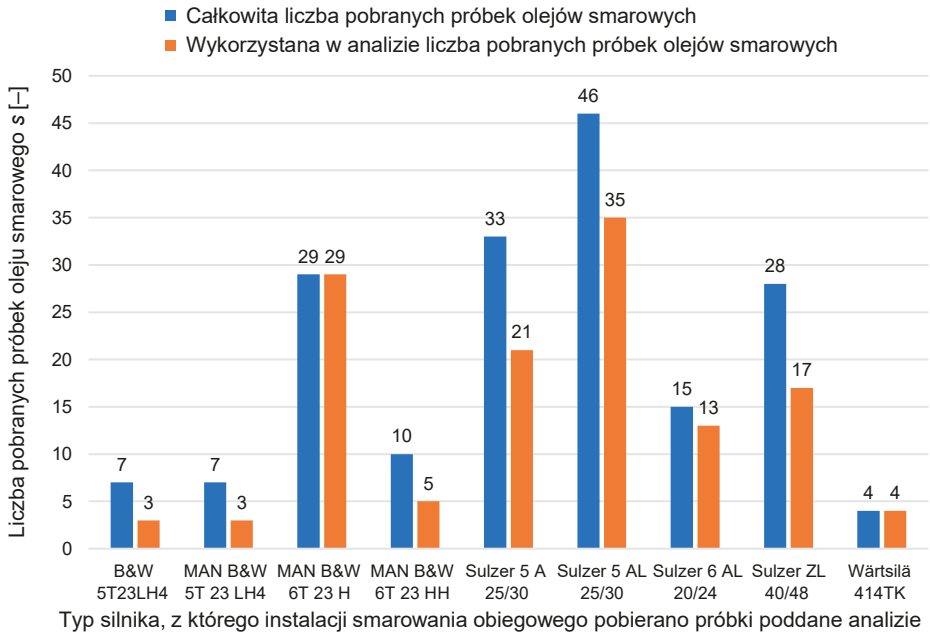
4.2.6. Zestawienie danych w podziale na model silnika okrętowego

Rozkład danych w zależności od modelu silnika, z którego pobrano próbki oleju smarowego przedstawiono na rysunkach 4.12 i 4.13.



Rys. 4.12. Czas pracy badanych olejów silnikowych wykorzystany w analizie w podziale na model silnika, z którego pobrano próbkę oleju smarowego

Największy udział czasowy odnotowano dla silników MAN B&W 6T 23 H (37 133 h z 42 475 h), Sulzer 5 AL 25/30 (31 841 h z 47 024 h) oraz Sulzer Zl 40/48 (17 303 h z 36 487 h). Wysoki udział charakteryzował również silnik Sulzer 5 A 25/30 (10 068 h z 17 961 h). Z kolei najmniejszy udział dotyczył silnika B&W 5T23LH4 (711 h z 4752 h) oraz Wartsila 414TK (2700 h z 2700 h), dla którego jednak całkowity czas obserwacji był najkrótszy. Spośród jednostek o większym zakresie obserwacji relatywnie niski udział odnotowano również dla silnika MAN B&W 6T 23 HH (2788 h z 6562 h).

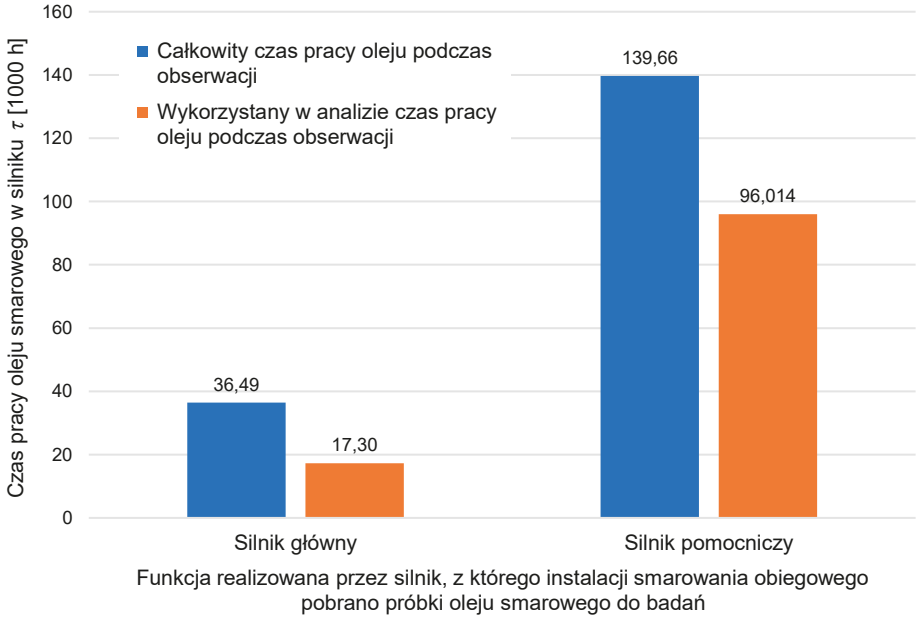


Rys. 4.13. Liczba próbek badanych olejów silnikowych wykorzystana w analizie w podziale na model silnika, z którego pobrano próbkę oleju smarowego

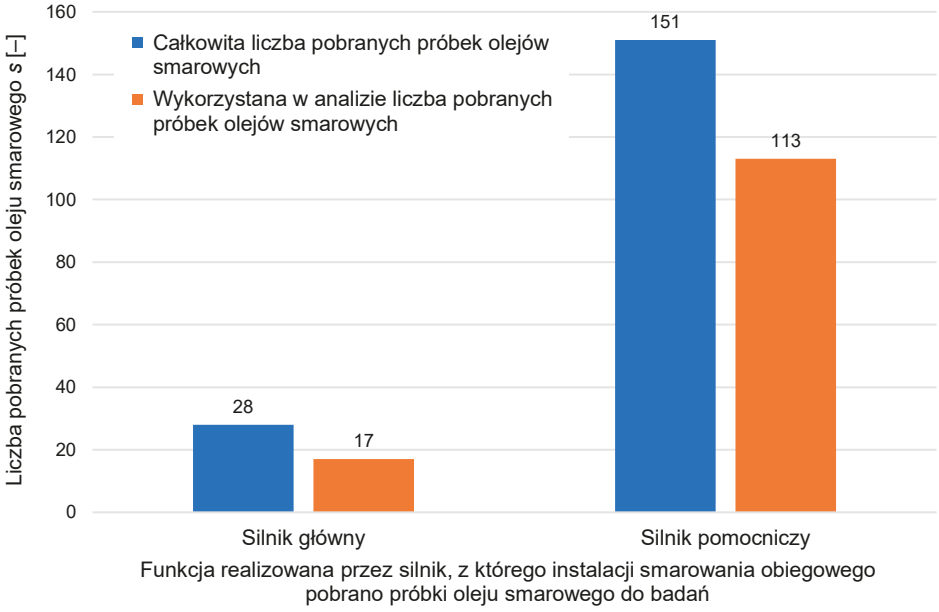
W odniesieniu do liczby próbek największą reprezentację miały silniki MAN B&W 6T 23 H (29 z 29 próbek) oraz Sulzer 5 AL 25/30 (35 z 46 próbek). Znaczną liczbę próbek uwzględnionych w analizie odnotowano także dla silników Sulzer 5 A 25/30 (21 z 33 próbek) oraz Sulzer Zl 40/48 (17 z 28 próbek). Najmniejszą reprezentację stanowiły silniki B&W 5T23LH4 i MAN B&W 5T 23 LH4, dla których wykorzystano po 3 z 7 pobranych próbek.

4.2.7. Zestawienie danych w podziale na funkcję realizowaną przez silnik

Rozkład danych w zależności od przeznaczenia silnika przedstawiono na rysunkach 4.14 i 4.15.



Rys. 4.14. Czas pracy badanych olejów silnikowych wykorzystany w analizie w podziale na przeznaczenie silnika, z którego pobrano próbkę oleju smarowego



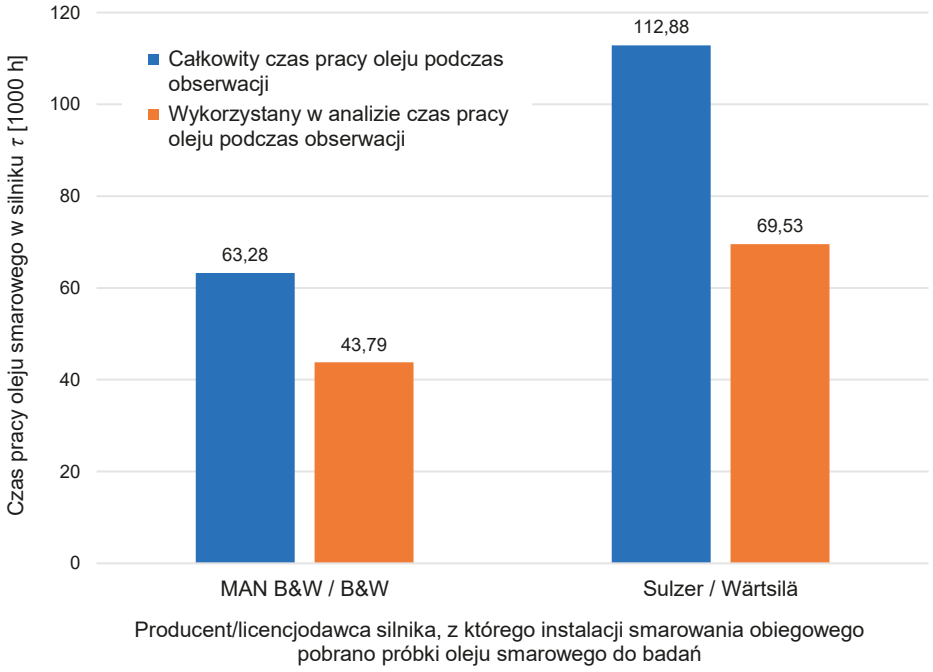
Rys. 4.15. Liczba próbek badanych olejów silnikowych wykorzystana w analizie w podziale na przeznaczenie silnika, z którego pobrano próbkę oleju smarowego

Dominującą grupę stanowiły silniki pomocnicze, dla których wykorzystano 96 014 h z 139 664 h, natomiast dla silników głównych było to 17 303 h z 36 487 h.

Wykorzystano 113 z 151 próbek dla silników pomocniczych oraz 17 z 28 dla silników głównych, co potwierdza wyraźną przewagę tej pierwszej grupy w zbiorze danych.

4.2.8. Zestawienie danych w podziale na licencjodawcę silnika

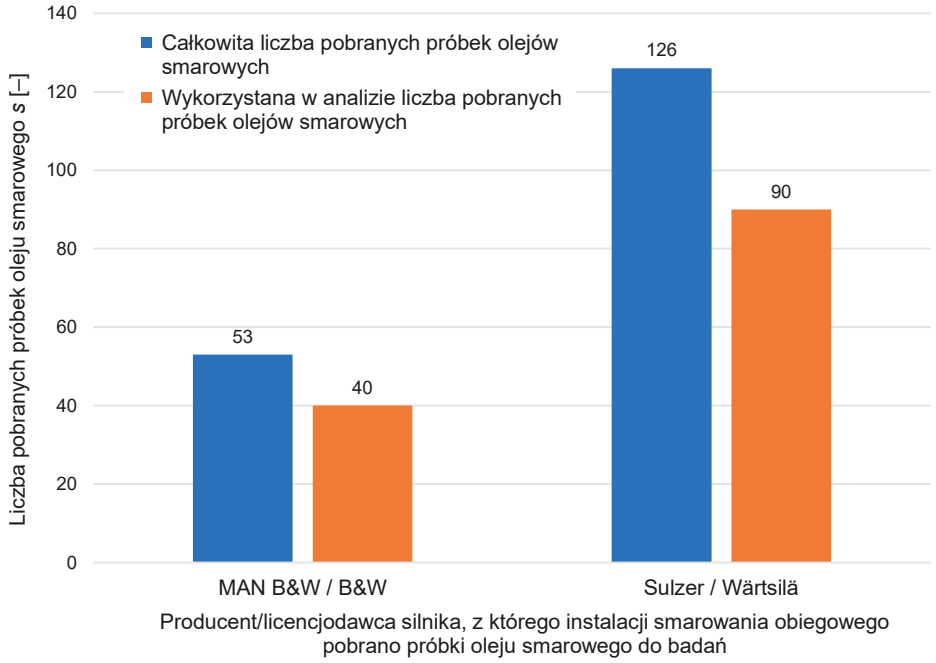
Rozkład danych w zależności od licencjodawcy silnika przedstawiono na rysunkach 4.16 i 4.17.



Rys. 4.16. Czas pracy badanych olejów silnikowych wykorzystany w analizie w podziale na producenta silnika, z którego pobrano próbkę oleju smarowego

Dla grupy Sulzer/Wärtsilä całkowity czas pracy wyniósł 112 876 h, z czego w analizie uwzględniono 69 531 h, natomiast dla MAN B&W/B&W było to 63 275 h oraz 43 786 h. Wskazuje to na większy udział pierwszej z grup w analizowanym zbiorze danych.

W odniesieniu do liczby próbek wykorzystano 90 z 126 dla Sulzer/Wärtsilä oraz 40 z 53 dla MAN B&W/B&W, co również potwierdza dominację pierwszej grupy w strukturze danych pomiarowych.



Rys. 4.17. Liczba próbek badanych olejów silnikowych wykorzystana w analizie w podziale na producenta silnika, z którego pobrano próbkę oleju smarowego

4.3. Wyniki analizy

4.3.1. Informacje wprowadzające

Analizie poddano 26 silników okrętowych, dla których dostępne były informacje o wynikach badań laboratoryjnych oleju smarowego przeprowadzonych w warunkach eksploatacyjnych, w tym temperatury zapłonu oleju. Dane te pozwoliły na wykorzystanie zaproponowanej metody, której wyniki przedstawione zostały w kolejnych podrozdziałach. Wykorzystując metodę zaproponowaną przez autora w rozdziale 3, dla każdego analizowanego silnika wyznaczono uśrednioną szybkość rozcieńczania oleju smarowego paliwem oraz wartości oszacowane czasu użytkowania oleju smarowego, przy których temperatura zapłonu uzyska progową wartość ostrzegawczą i alarmową.

4.3.2. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Generał Bem

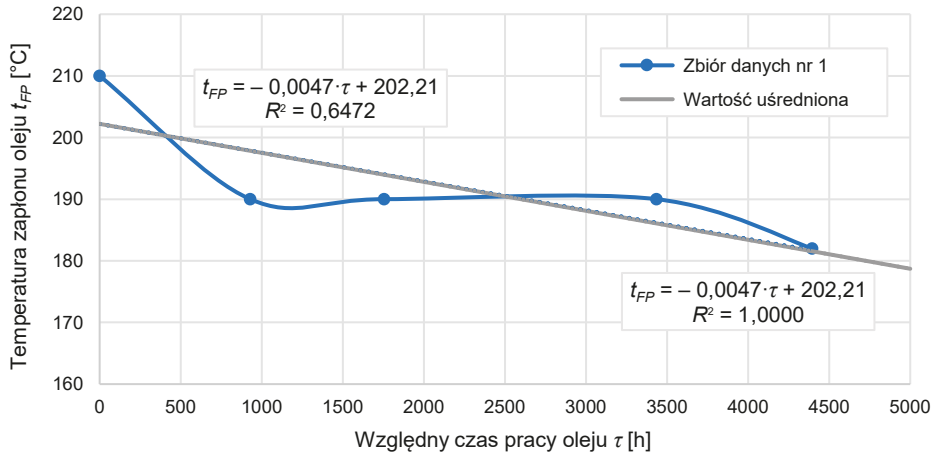
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.3.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.18.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.4.

Tabela 4.3. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Generał Bem

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Generał Bem
Model silnika	Sulzer 5 AL 25/30
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 3
Olej smarowy	BP Energol DL-MP 40
Uwzględniony czas pracy oleju	4395 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	5



Rys. 4.18. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Generał Bem

Tabela 4.4. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Generał Bem

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem v_{1000} [% wag./1000 h]	0,42
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	4,726
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	9,452

4.3.3. Silnik pomocniczy nr 1 statku m/s Generał Jasiński

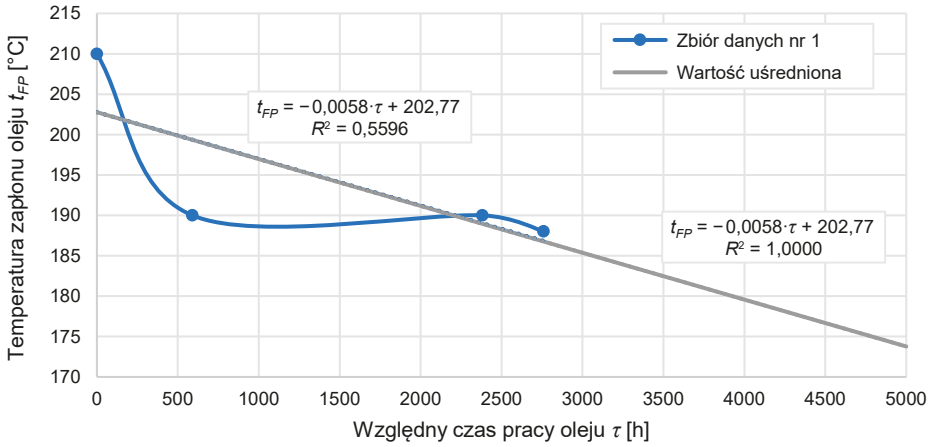
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.5.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.19.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.6.

Tabela 4.5. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Generał Jasiński

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Generał Jasiński
Model silnika	Sulzer 5 AL 25/30
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 1
Olej smarowy	BP Energol DL-MP 40
Uwzględniony czas pracy oleju	2759 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	4



Rys. 4.19. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Generał Jasiński

Tabela 4.6. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Generał Jasiński

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem v_{1000} [% wag./1000 h]	0,51
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	3,926
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	7,852

4.3.4. Silnik pomocniczy nr 2 statku m/s Generał Jasiński

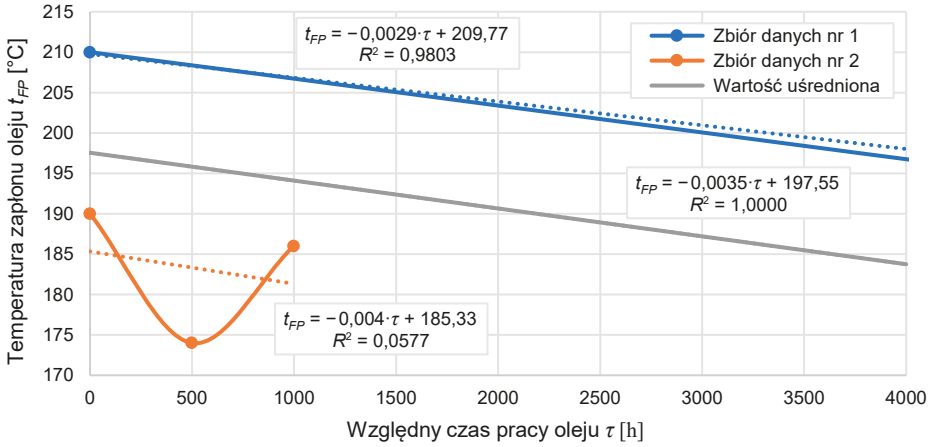
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.7.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.20.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.8.

Tabela 4.7. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Generał Jasiński

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Generał Jasiński
Model silnika	Sulzer 5 AL 25/30
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 2
Olej smarowy	BP Energol DL-MP 40
Uwzględniony czas pracy oleju	5014 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	7



Rys. 4.20. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Generał Jasiński

Tabela 4.8. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Generał Jasiński

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem v_{1000} [% wag./1000 h]	0,40
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	5,014
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	10,028

4.3.5. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Generał Jasiński

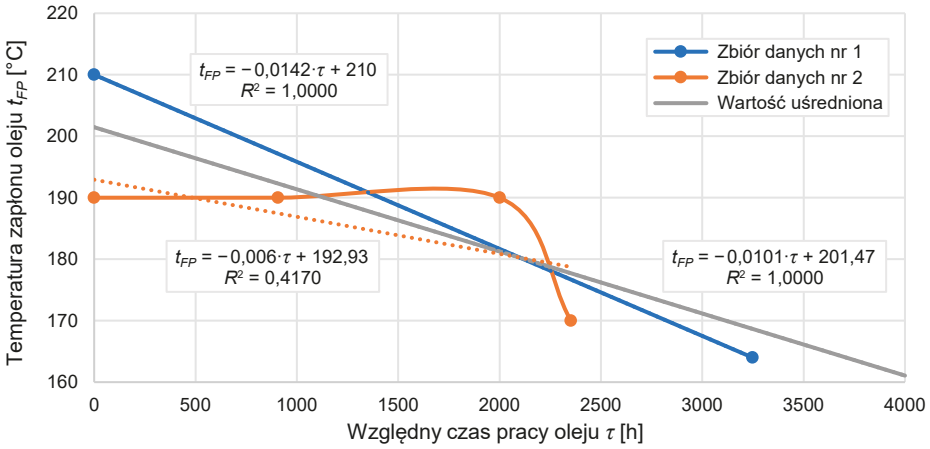
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.9.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.21.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.10.

Tabela 4.9. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Generał Jasiński

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Generał Jasiński
Model silnika	Sulzer 5 AL 25/30
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 3
Olej smarowy	BP Energol DL-MP 40
Uwzględniony czas pracy oleju	5600 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	6



Rys. 4.21. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Generał Jasiński

Tabela 4.10. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Generał Jasiński

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem v_{1000} [% wag./1000 h]	0,94
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	2,126
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	4,252

4.3.6. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Generał Madaliński

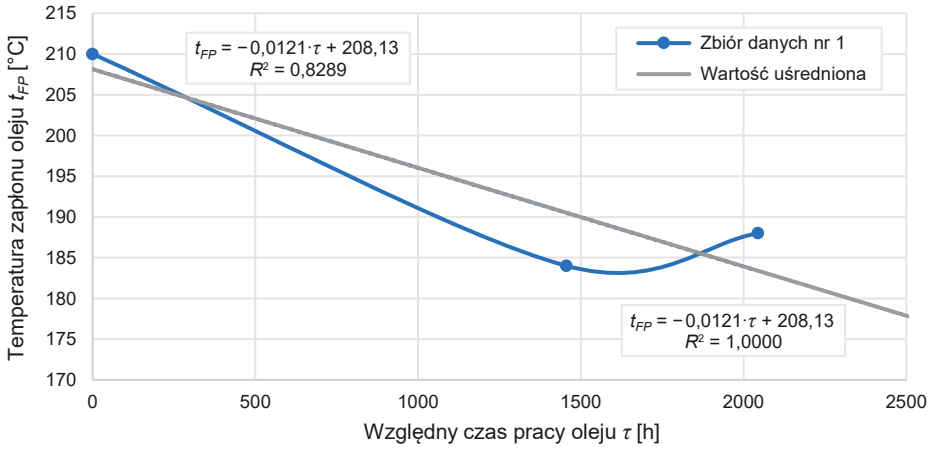
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.11.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.22.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.12.

Tabela 4.11. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Generał Madaliński

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Generał Madaliński
Model silnika	Sulzer 5 AL 25/30
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 3
Olej smarowy	BP Energol DL-MP 40
Uwzględniony czas pracy oleju	2044 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	3



Rys. 4.22. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Generał Madaliński

Tabela 4.12. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Generał Madaliński

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem v_{1000} [% wag./1000 h]	0,86
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	2,324
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	4,648

4.3.7. Silnik główny statku m/s Goleniów

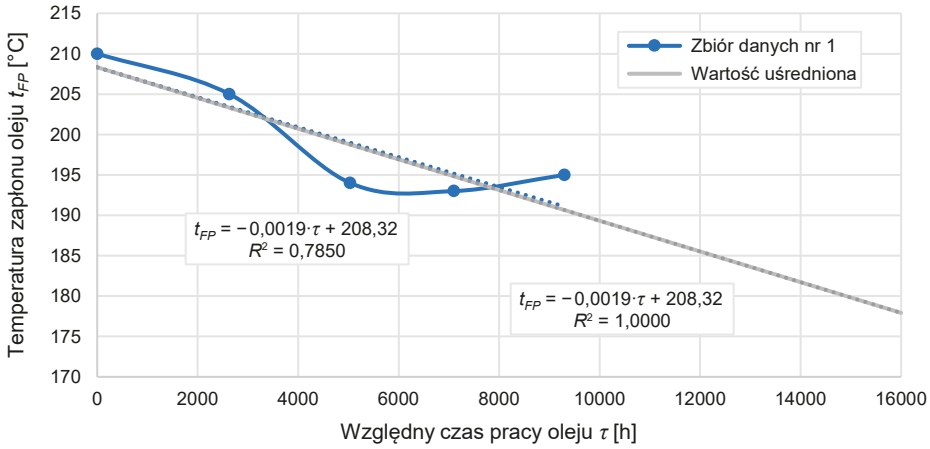
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.13.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.23.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.14.

Tabela 4.13. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika głównego statku m/s Goleniów

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Goleniów
Model silnika	Zgoda Sulzer ZL 40/48
Przeznaczenie silnika	Silnik główny
Olej smarowy	Elf Aurelia XT 4040
Uwzględniony czas pracy oleju	9300 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	5



Rys. 4.23. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika głównego statku m/s Goleniów

Tabela 4.14. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika głównego statku m/s Goleniów

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem v_{1000} [% wag./1000 h]	0,13
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	14,905
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	29,810

4.3.8. Silnik pomocniczy nr 2 statku m/s Kopalnia Gottwald

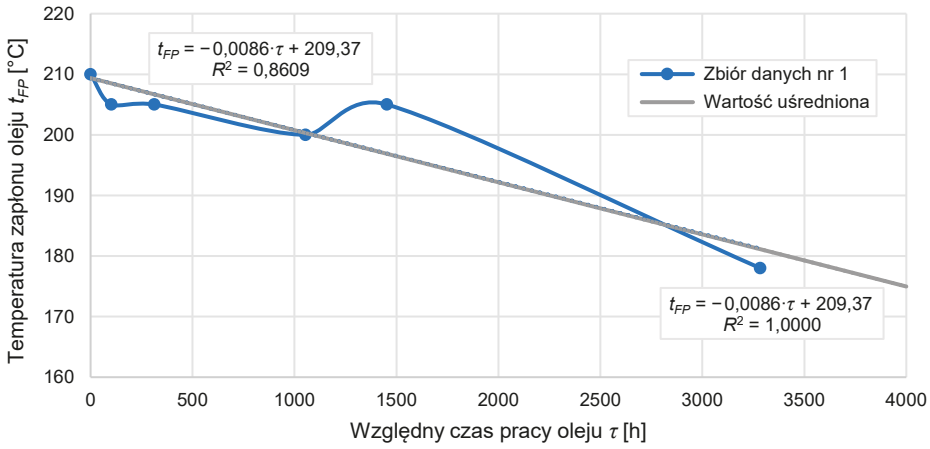
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.15.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.24.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.16.

Tabela 4.15. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Kopalnia Gottwald

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Kopalnia Gottwald
Model silnika	Sulzer 6 AL 20/24
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 2
Olej smarowy	Mobil Mobilgard 412
Uwzględniony czas pracy oleju	3284 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	6



Rys. 4.24. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Kopalnia Gottwald

Tabela 4.16. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Kopalnia Gottwald

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem v_{1000} [% wag./1000 h]	0,59
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	3,415
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	3,830

4.3.9. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Kopalnia Machów

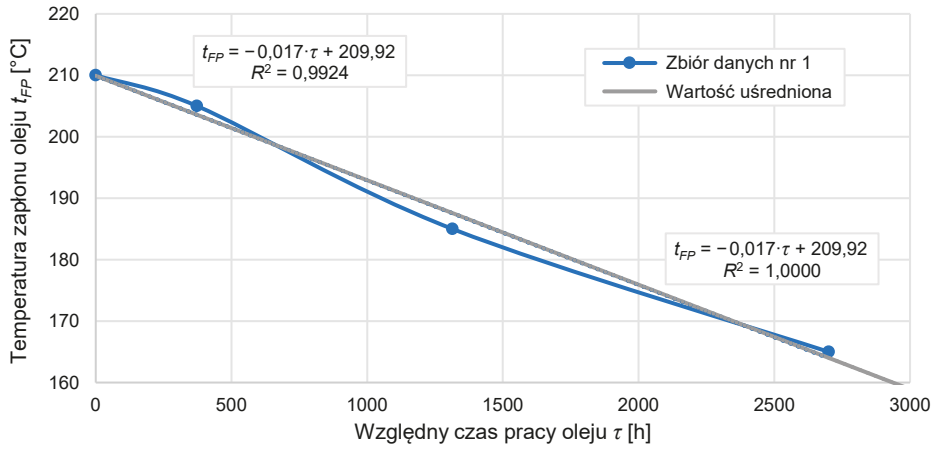
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.17.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.25.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.18.

Tabela 4.17. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Kopalnia Machów

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Kopalnia Machów
Model silnika	Wärtsilä 414TK
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 3
Olej smarowy	Elf Disola M4015
Uwzględniony czas pracy oleju	2700 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	4



Rys. 4.25. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Kopalnia Machów

Tabela 4.18. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Kopalnia Machów

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem v_{1000} [% wag./1000 h]	1,14
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	1,760
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	3,520

4.3.10. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Mirosławiec

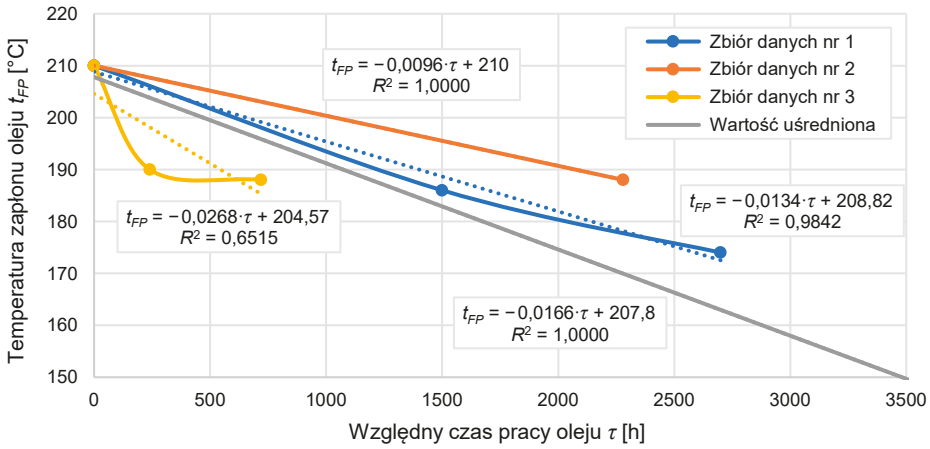
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.19.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.26.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.20.

Tabela 4.19. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Mirosławiec

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Mirosławiec
Model silnika	Sulzer 5 AL 25/30
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 3
Olej smarowy	BP Energol DL-MP 40
Uwzględniony czas pracy oleju	4980 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	5



Rys. 4.26. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Mirosławiec

Tabela 4.20. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Mirosławiec

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem ν_{1000} [% wag./1000 h]	1,19
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	1,675
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	3,350

4.3.11. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Pomorze Zachodnie

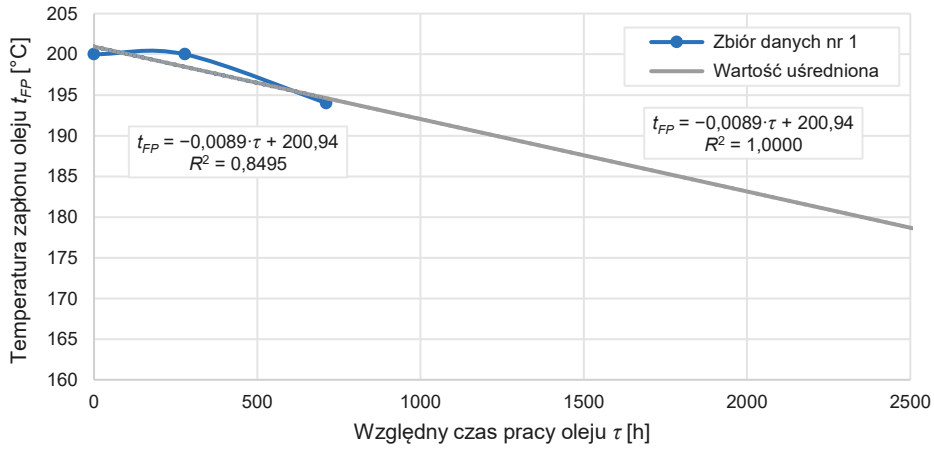
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.21.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.27.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.22.

Tabela 4.21. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Pomorze Zachodnie

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Pomorze Zachodnie
Model silnika	B&W 5T23LH4
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 3
Olej smarowy	Castrol MXD 303
Uwzględniony czas pracy oleju	711 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	3



Rys. 4.27. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Pomorze Zachodnie

Tabela 4.22. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Pomorze Zachodnie

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem v_{1000} [% wag./1000 h]	0,85
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	2,353
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	4,706

4.3.12. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Powstaniec Styczniowy

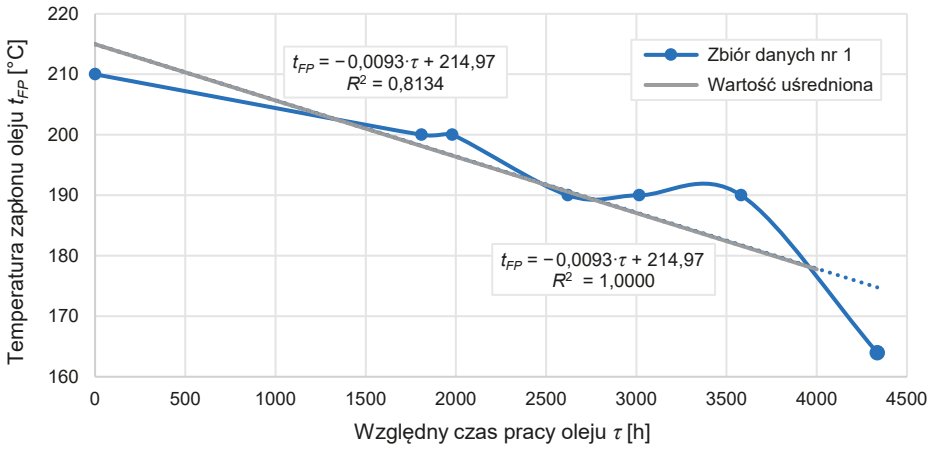
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.23.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.28.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.24.

Tabela 4.23. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Powstaniec Styczniowy

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Powstaniec Styczniowy
Model silnika	Sulzer 6 AL 20/24
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 3
Olej smarowy	BP Energol DL-MP 40
Uwzględniony czas pracy oleju	4335 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	7



Rys. 4.28. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Powstaniec Styczniowy

Tabela 4.24. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Powstaniec Styczniowy

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem v_{1000} [% wag./1000 h]	0,53
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	3,760
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	7,520

4.3.13. Silnik pomocniczy nr 1 statku m/s Powstaniec Warszawski

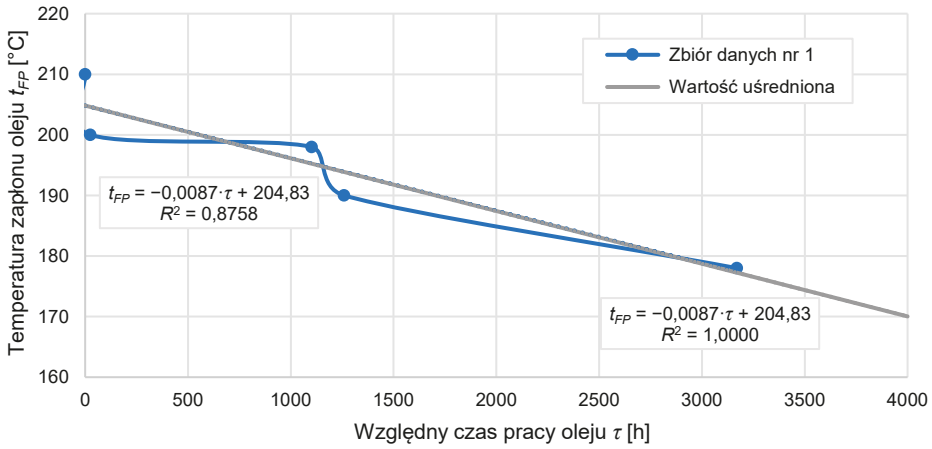
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.25.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.29.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.26.

Tabela 4.25. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Powstaniec Warszawski

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Powstaniec Warszawski
Model silnika	Sulzer 5 AL 25/30
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 1
Olej smarowy	Castrol MPX 40
Uwzględniony czas pracy oleju	3170 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	5



Rys. 4.29. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Powstaniec Warszawski

Tabela 4.26. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Powstaniec Warszawski

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem ν_{1000} [% wag./1000 h]	0,70
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	2,854
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	5,708

4.3.14. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Studzianki

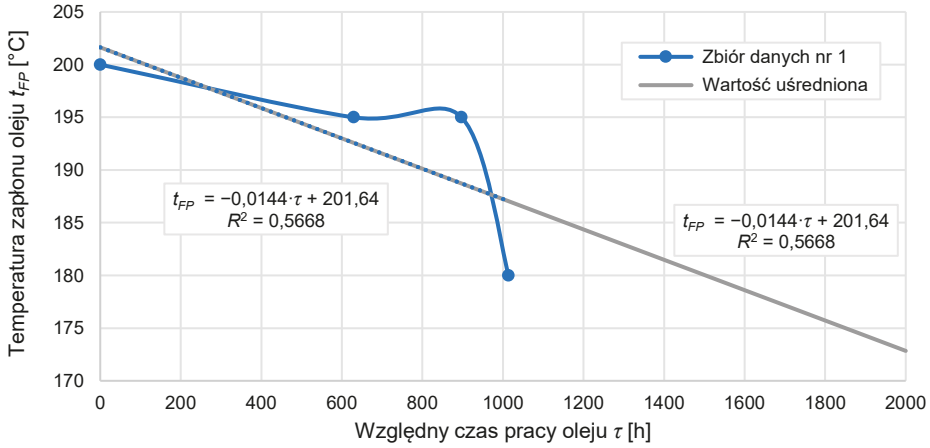
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.27.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.30.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.28.

Tabela 4.27. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Studzianki

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Studzianki
Model silnika	Sulzer 5 A 25/30
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 3
Olej smarowy	Elf Disola M4015
Uwzględniony czas pracy oleju	1014 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	4



Rys. 4.30. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Studzianki

Tabela 4.28. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Studzianki

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem ν_{1000} [% wag./1000 h]	1,33
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	1,503
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	3,006

4.3.15. Silnik pomocniczy nr 1 statku m/s Syn Pułku

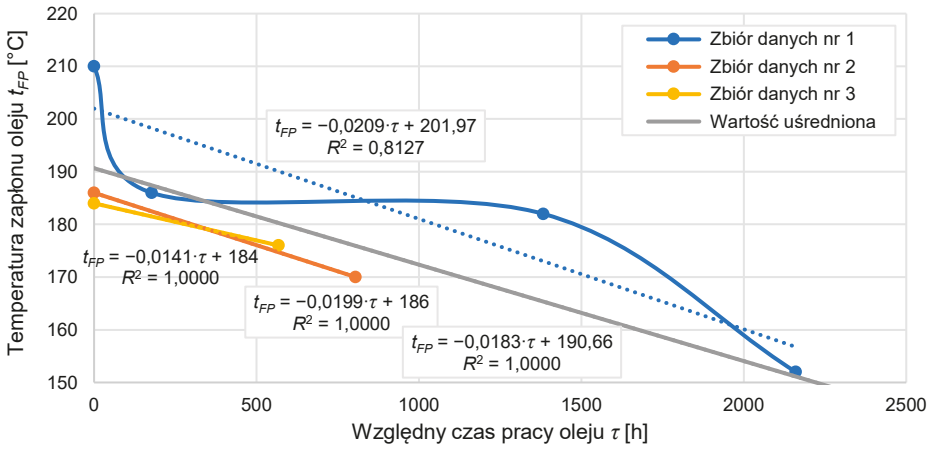
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.29.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.31.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.30.

Tabela 4.29. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Syn Pułku

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Syn Pułku
Model silnika	Sulzer 5 A 25/30
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 1
Olej smarowy	Castrol MLC 40
Uwzględniony czas pracy oleju	1425 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	5



Rys. 4.31. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Syn Pułku

Tabela 4.30. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Syn Pułku

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem v_{1000} [% wag./1000 h]	2,84
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	0,704
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	1,408

4.3.16. Silnik pomocniczy nr 2 statku m/s Syn Pułku

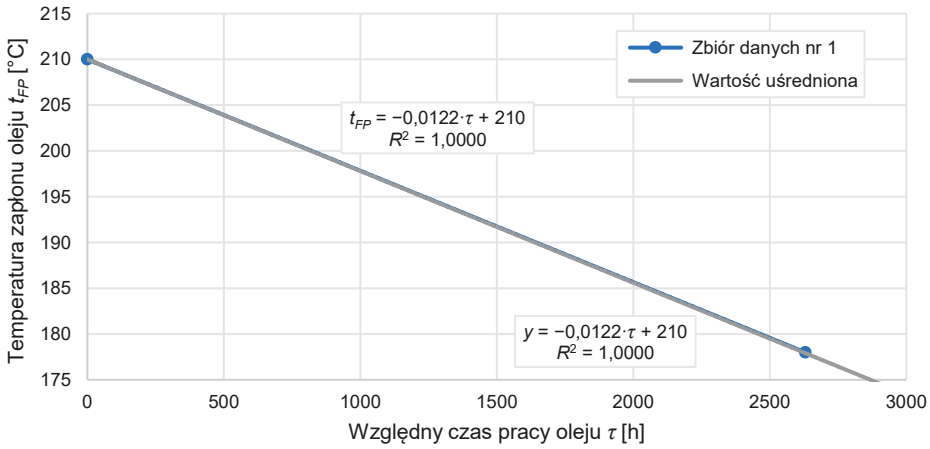
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.31.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.32.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.32.

Tabela 4.31. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Syn Pułku

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Syn Pułku
Model silnika	Sulzer 5 A 25/30
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 2
Olej smarowy	BP Energol DL-MP 40
Uwzględniony czas pracy oleju	2630 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	2



Rys. 4.32. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Syn Pułku

Tabela 4.32. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Syn Pułku

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem v_{1000} [% wag./1000 h]	0,81
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	2,459
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	4,918

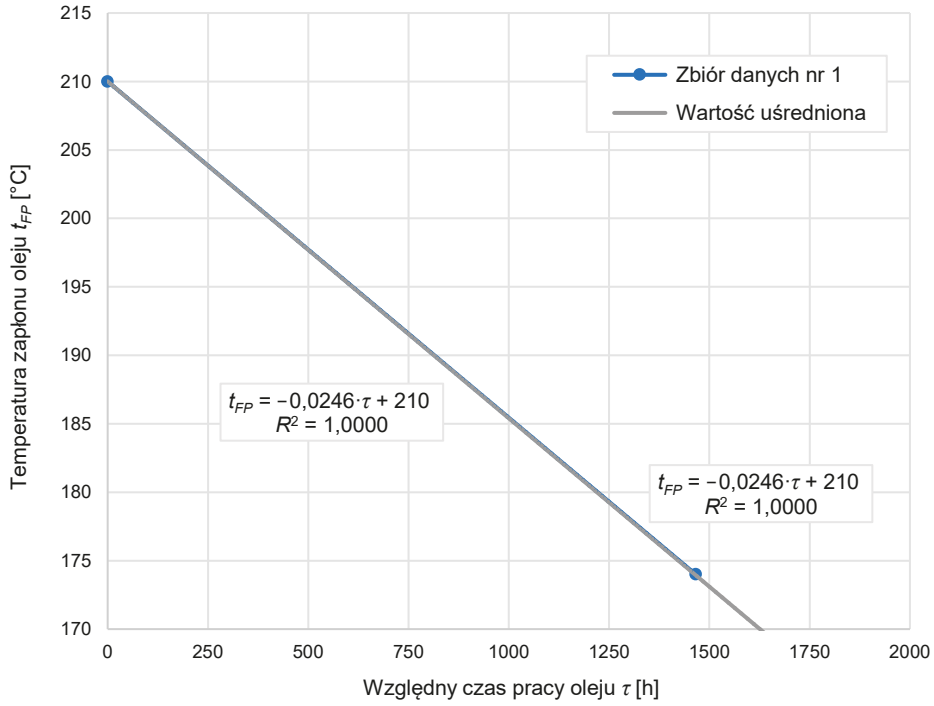
4.3.17. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Syn Pułku

Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.33.

Tabela 4.33. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Syn Pułku

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Syn Pułku
Model silnika	Sulzer 5 A 25/30
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 3
Olej smarowy	BP Energol DL-MP 40
Uwzględniony czas pracy oleju	1466 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	2

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.33.



Rys. 4.33. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Syn Pułku

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.34.

Tabela 4.34. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Syn Pułku

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem v_{1000} [% wag./1000 h]	1,64
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	1,220
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	2,440

4.3.18. Silnik pomocniczy nr 1 statku m/s Syn Pułku (zamiana oleju smarowego)

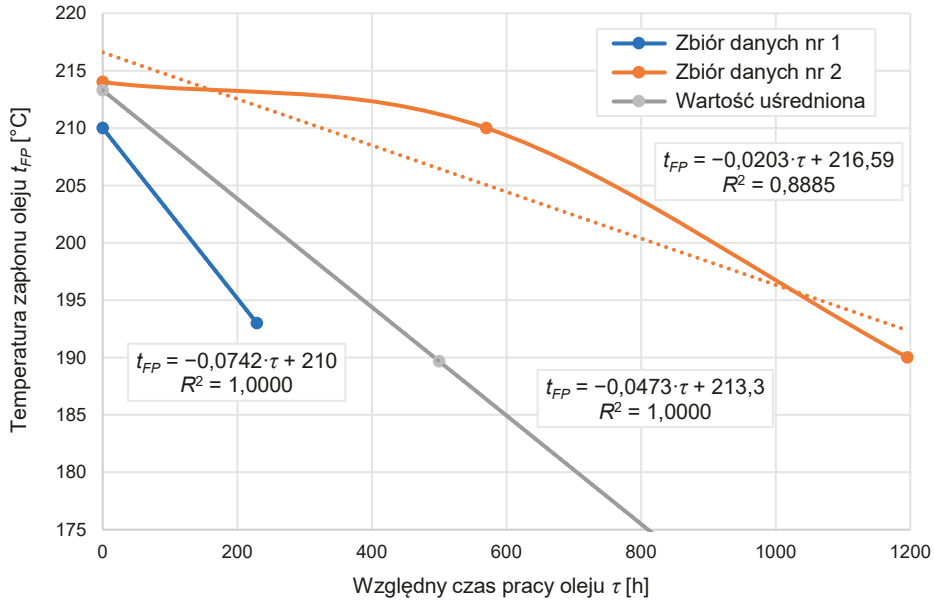
Przedstawiony w niniejszym podrozdziale zestaw danych dotyczy silnika wcześniej opisanego w podrozdziale 4.3.14, jednak w innym okresie eksploatacji silnika, w którym w instalacji obiegowego smarowania silnika wykorzystany jest inny olej smarowy. Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.35.

Tabela 4.35. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Syn Pułku (zmiana oleju smarowego)

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Syn Pułku
Model silnika	Sulzer 5 A 25/30
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 1
Olej smarowy	BP Energol DL-MP 40
Uwzględniony czas pracy oleju	3533 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	8

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.34.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.36.



Rys. 4.34. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Syn Pułku (zmiana oleju smarowego)

Tabela 4.36. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Syn Pułku (zmiana oleju smarowego)

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem ν_{1000} [% wag./1000 h]	1,90
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem *C* równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	1,051
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem *C* równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	2,102

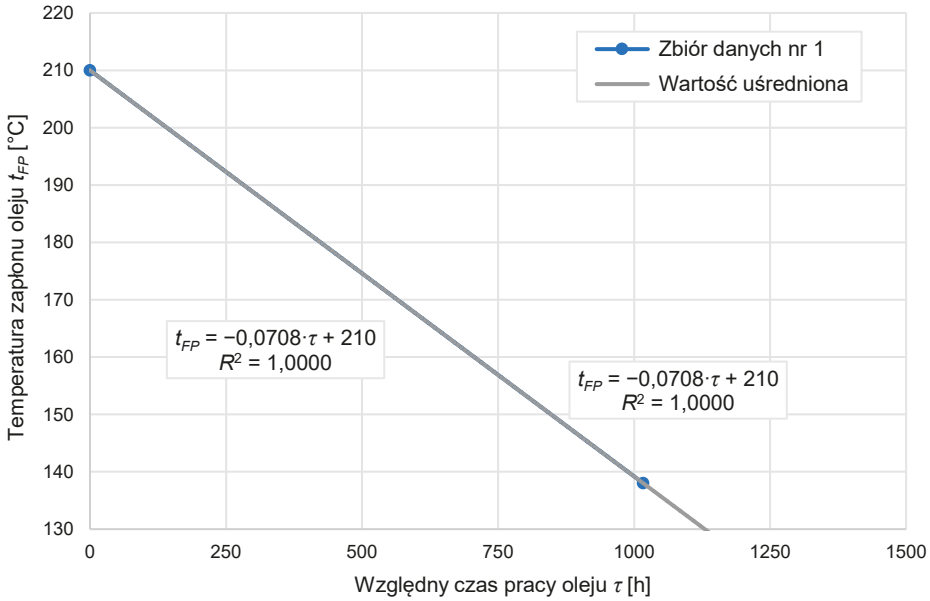
4.3.19. Silnik pomocniczy nr 1 statku m/s Uniwersytet Jagielloński

Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.37.

Tabela 4.37. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Uniwersytet Jagielloński

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Uniwersytet Jagielloński
Model silnika	MAN B&W 6T 23 HH
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 1
Olej smarowy	Energol DL-MP 30
Uwzględniony czas pracy oleju	1017 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	2

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.35.



Rys. 4.35. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Uniwersytet Jagielloński

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.38.

Tabela 4.38. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Uniwersytet Jagielloński

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem v_{1000} [% wag./1000 h]	4,72
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	0,424
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	0,848

4.3.20. Silnik pomocniczy nr 2 statku m/s Uniwersytet Jagielloński

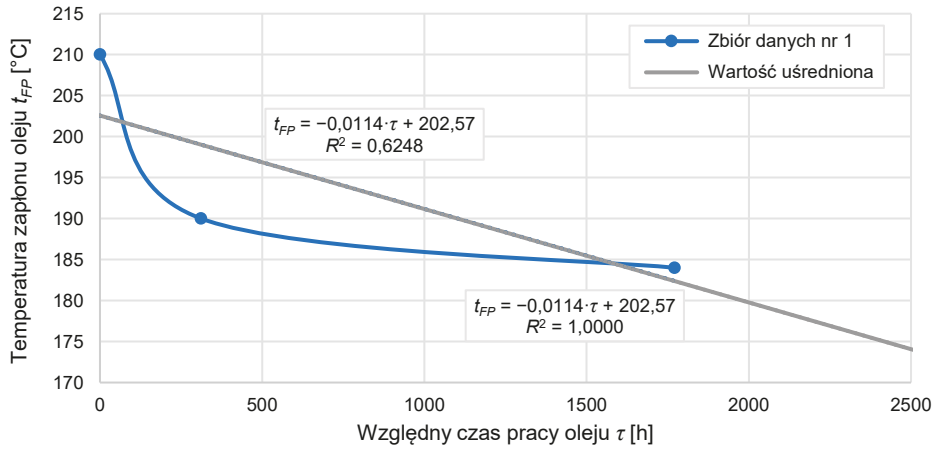
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.39.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.36.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.40.

Tabela 4.39. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Uniwersytet Jagielloński

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Uniwersytet Jagielloński
Model silnika	MAN B&W 6T 23 HH
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 2
Olej smarowy	Energol DL-MP 30
Uwzględniony czas pracy oleju	1771 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	3



Rys. 4.36. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Uniwersytet Jagielloński

Tabela 4.40. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Uniwersytet Jagielloński

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem ν_{1000} [% wag./1000 h]	1,01
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	1,980
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	3,960

4.3.21. Silnik pomocniczy nr 1 statku m/s Uniwersytet Warszawski

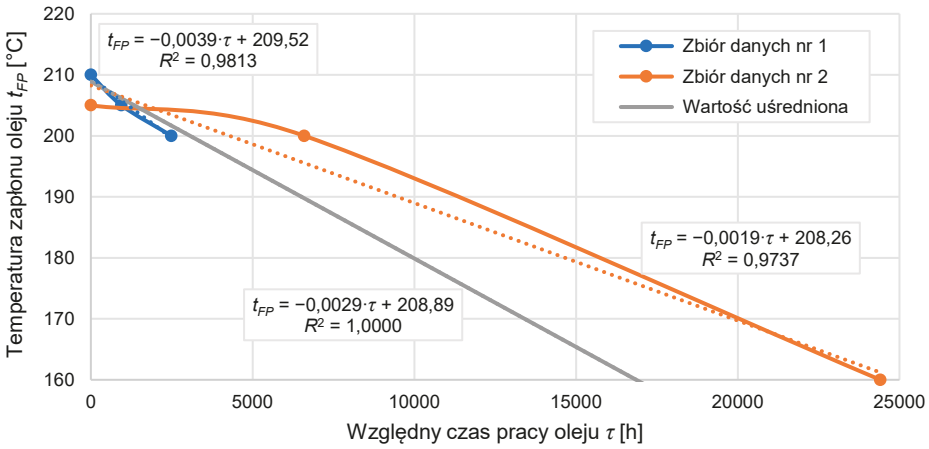
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.41.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.37.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.42.

Tabela 4.41. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Uniwersytet Warszawski

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Uniwersytet Warszawski
Model silnika	B&W 6 T23 LH
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 1
Olej smarowy	Mobil Mobilgard 312
Uwzględniony czas pracy oleju	26898 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	6



Rys. 4.37. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Uniwersytet Warszawski

Tabela 4.42. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Uniwersytet Warszawski

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem v_{1000} [% wag./1000 h]	0,20
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	9,962
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	19,924

4.3.22. Silnik pomocniczy nr 1 statku m/s Uniwersytet Wrocławski

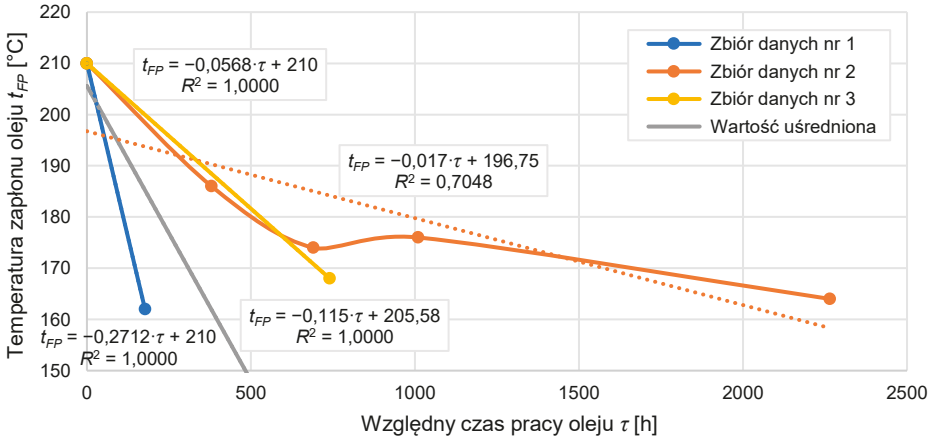
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.43.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.38.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.44.

Tabela 4.43. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Uniwersytet Wrocławski

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Uniwersytet Wrocławski
Model silnika	MAN B&W 6T 23 H
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 1
Olej smarowy	Energol DL-MP 30
Uwzględniony czas pracy oleju	3182 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	9



Rys. 4.38. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Uniwersytet Wrocławski

Tabela 4.44. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Uniwersytet Wrocławski

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem ν_{1000} [% wag./1000 h]	8,99
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	0,222
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	0,444

4.3.23. Silnik pomocniczy nr 2 statku m/s Uniwersytet Wrocławski

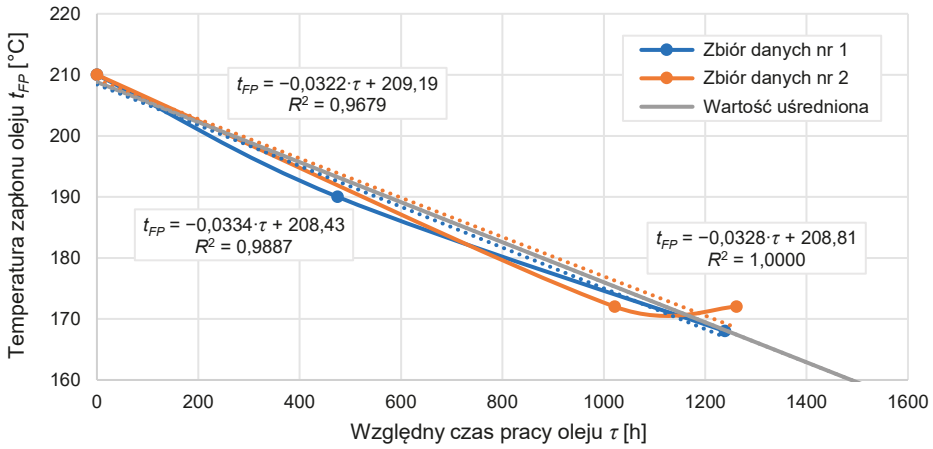
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.45.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.39.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.46.

Tabela 4.45. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Uniwersytet Wrocławski

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Uniwersytet Wrocławski
Model silnika	MAN B&W 6T 23 H
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 2
Olej smarowy	Energol DL-MP 30
Uwzględniony czas pracy oleju	2805 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	7



Rys. 4.39. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Uniwersytet Wrocławski

Tabela 4.46. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Uniwersytet Wrocławski

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem ν_{1000} [% wag./1000 h]	2,28
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	0,876
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	1,752

4.3.24. Silnik pomocniczy nr 3 statku m/s Uniwersytet Wrocławski

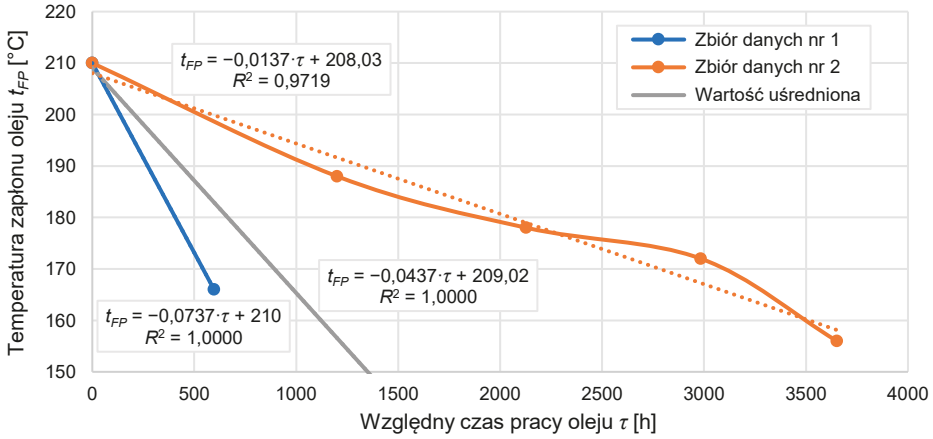
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.47.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.40.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.48.

Tabela 4.47. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Uniwersytet Wrocławski

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Uniwersytet Wrocławski
Model silnika	MAN B&W 6T 23 H
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 3
Olej smarowy	Energol DL-MP 30
Uwzględniony czas pracy oleju	4248 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	7



Rys. 4.40. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Uniwersytet Wrocławski

Tabela 4.48. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Uniwersytet Wrocławski

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem ν_{1000} [% wag./1000 h]	3,01
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	0,664
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	1,328

4.3.25. Silnik główny statku m/s Wyszków

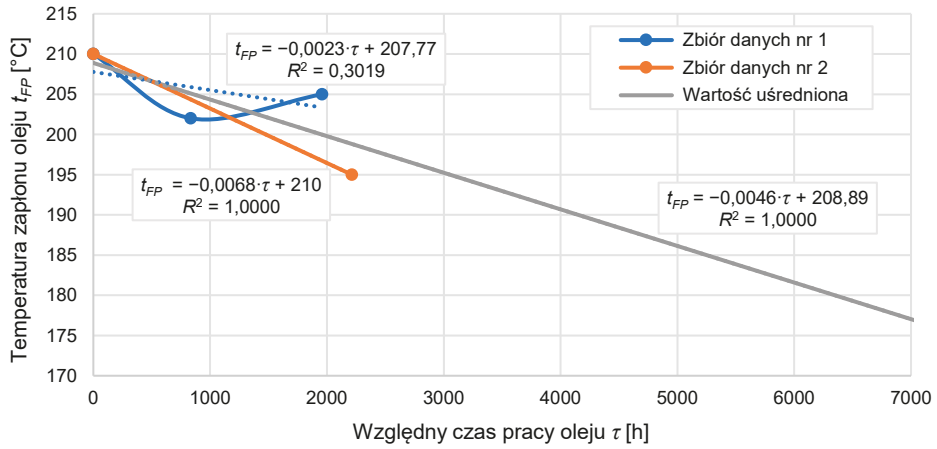
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.49.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.41.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.50.

Tabela 4.49. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika głównego statku m/s Wyszków

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Wyszków
Model silnika	Zgoda Sulzer ZL 40/48
Przeznaczenie silnika	Silnik główny
Olej smarowy	Elf Aurelia XT 4040
Uwzględniony czas pracy oleju	3173 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	5



Rys. 4.41. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika głównego statku m/s Wyszków

Tabela 4.50. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika głównego statku m/s Wyszków

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem v_{1000} [% wag./1000 h]	0,32
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	6,280
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	12,560

4.3.26. Silnik główny statku m/s Zgorzelec

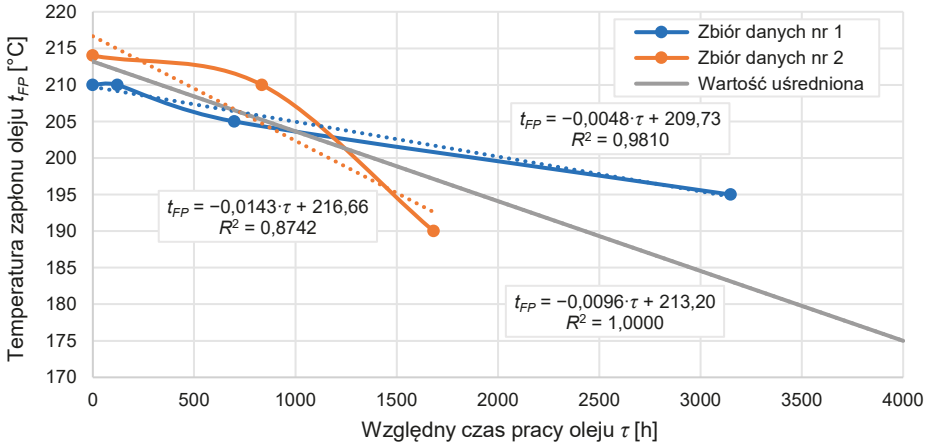
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.51.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.42.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.52.

Tabela 4.51. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika głównego statku m/s Zgorzelec

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Zgorzelec
Model silnika	Zgoda Sulzer ZL 40/48
Przeznaczenie silnika	Silnik główny
Olej smarowy	Elf Aurelia XT 4040
Uwzględniony czas pracy oleju	4830 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	7



Rys. 4.42. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika głównego statku m/s Zgorzelec

Tabela 4.52. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika głównego statku m/s Zgorzelec

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem v_{1000} [% wag./1000 h]	0,58
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	3,458
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	6,916

4.3.27. Silnik pomocniczy nr 1 statku m/s Ziemia Chełmińska

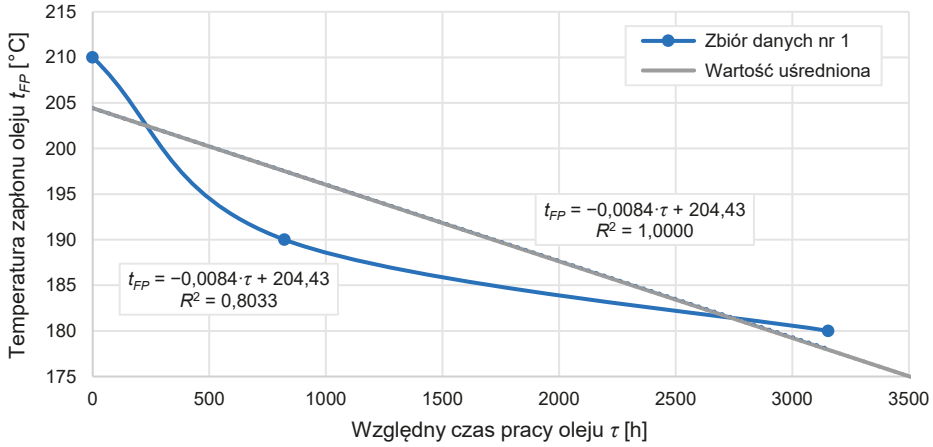
Główne informacje o obiekcie analizy zestawiono w tabeli 4.53.

Model zmiany temperatury zapłonu w tyglu zamkniętym w funkcji czasu użytkowania oleju wyznaczony z wykorzystaniem metody opisanej w rozdziale 3 przedstawiono na rysunku 4.43.

Oszacowane wartości parametrów charakteryzujących proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem przedstawiono w tabeli 4.54.

Tabela 4.53. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Ziemia Chełmińska

Wyszczególnienie	Opis / wartość
Statek	m/s Ziemia Chełmińska
Model silnika	MAN B&W 5T 23 LH4
Przeznaczenie silnika	Silnik pomocniczy nr 1
Olej smarowy	BP Energol IC-HF 303
Uwzględniony czas pracy oleju	3154 h
Uwzględniona liczba próbek oleju	3



Rys. 4.43. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Ziemia Chełmińska

Tabela 4.54. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Ziemia Chełmińska

Wyszczególnienie	Wartość
Wskaźnik szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem v_{1000} [% wag./1000 h]	0,69
Czas użytkowania oleju do uzyskania ostrzegawczej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 2% wag. τ_2 [1000 h]	2,908
Czas użytkowania oleju do uzyskania alarmowej wartości progowej zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem C równej 4% wag. τ_4 [1000 h]	5,816

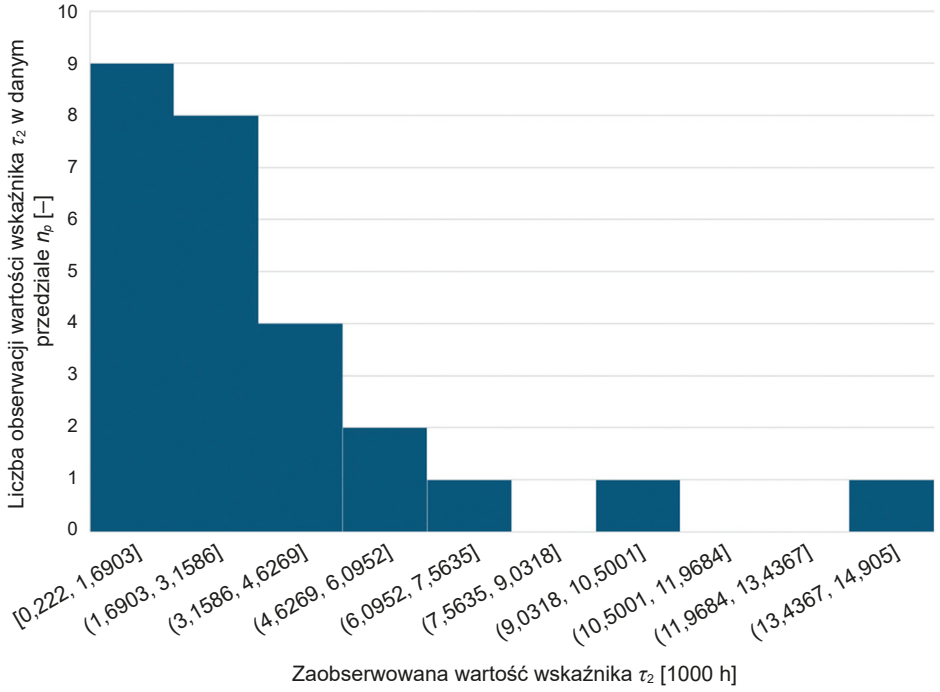
4.4. Ocena zbiorcza szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem

4.4.1. Ogólne obserwacje statystyczne

Analiza 26 przypadków eksploatacyjnych wykazała znaczną zmienność parametrów charakteryzujących zmianę właściwości oleju smarowego w aspekcie zmian temperatury zapłonu. Wartości τ_{gr} czasu użytkowania oleju do momentu przekroczenia wartości progowej stopnia rozcieńczenia oleju smarowego paliwem równego C_{gr} = 2% wag. w związku z przyjętym modelem liniowym (stała szybkość rozcieńczania oleju smarowego paliwem v_{1000} = constans) są dwa razy mniejsze niż wartości alarmowego progowego stopnia rozcieńczenia równego C_{gr} = 4% wag., co można opisać w postaci:

$$\tau_4 = 2 \cdot \tau_2 \tag{4.1}$$

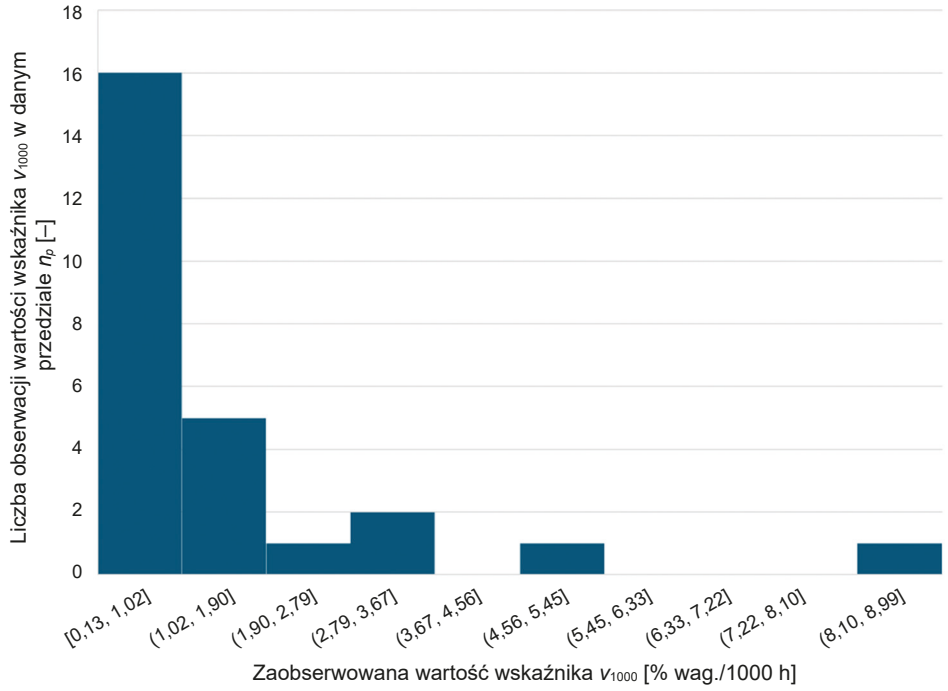
Dla przeprowadzonego przykładu aplikacyjnego wartości τ_{gr} dla C_{gr} = 2% wag. zmieniały się w zakresie od 222 do 14 905 h, natomiast wartości wskaźnika v_{1000}



Rys. 4.44. Histogram długości czasu do uzyskania progowego poziomu alarmowego τ_2

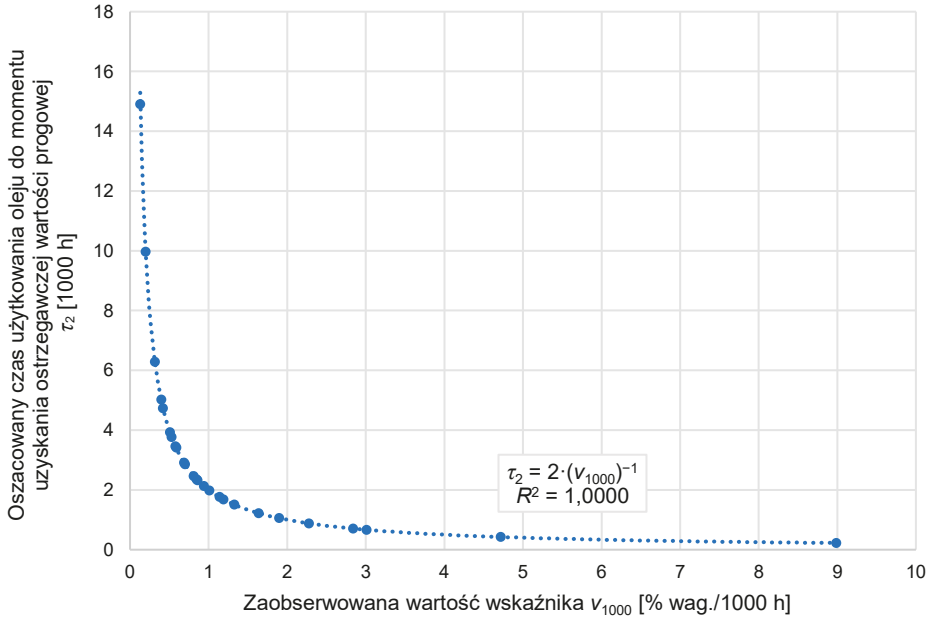
szybkości narastania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem wartości zawierały się w zakresie od 0,13 do 8,99% wag./1000 h. Oznacza to ponad 67-krotną zmienność trwałości oleju oraz niemal 70-krotną zmienność szybkości degradacji. Świadczy to o bardzo dużym spektrum stanu technicznego analizowanych silników, który w istotny sposób wpływa na stopień degradacji oleju. Histogramy prezentujące częstość występowania wartości wymienionych wskaźników w podziale na zakres przedstawiono odpowiednio na rysunkach 4.44 i 4.45.

Wstępnie jako adekwatny model statystyczny dla analizowanych zmiennych τ_2 oraz ν_{1000} przyjęto rozkład logarytmiczno-normalny, co wynika z ich dodatniej dziedziny, silnej prawostronnej skośności oraz dużej rozpiętości wartości. Struktura danych wskazuje na mechanizm multiplikatywny, w którym zmienna jest iloczynem wielu niezależnych czynników losowych, co implikuje normalność rozkładu po transformacji logarytmicznej.



Rys. 4.45. Histogram wartości zaobserwowanych szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem ν_{1000}

Dodatkowo obserwowana nieliniowa zależność między zmiennymi jest zgodna z modelem potęgowym (rys. 4.46) w przestrzeni logarytmicznej, co stabilizuje wariancję i prowadzi do symetryzacji rozkładu.



Rys. 4.46. Wyznaczone wartości wskaźników v_{1000} oraz τ_2 dla analizowanych silników

W konsekwencji rozkład log-normalny stanowi najbardziej spójne i teoretycznie uzasadnione przybliżenie struktury danych.

4.4.2. Rozkłady prawdopodobieństwa realizacji wskaźników τ_2 oraz v_{1000}

Dopasowanie rozkładu logarytmiczno-normalnego zweryfikowano za pomocą testu Kołmogorowa–Smirnowa (K-S) przeprowadzonego dla danych po transformacji logarytmem naturalnym. Dla obu zmiennych oznaczonych ogólnie jako x rozważono zależność funkcyjną postaci:

$$y = \ln(x) \tag{4.2}$$

Następnie testowano hipotezę zerową zakładającą zgodność rozkładu zmiennej Y z rozkładem normalnym:

$$H_0: y \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2) \tag{4.3}$$

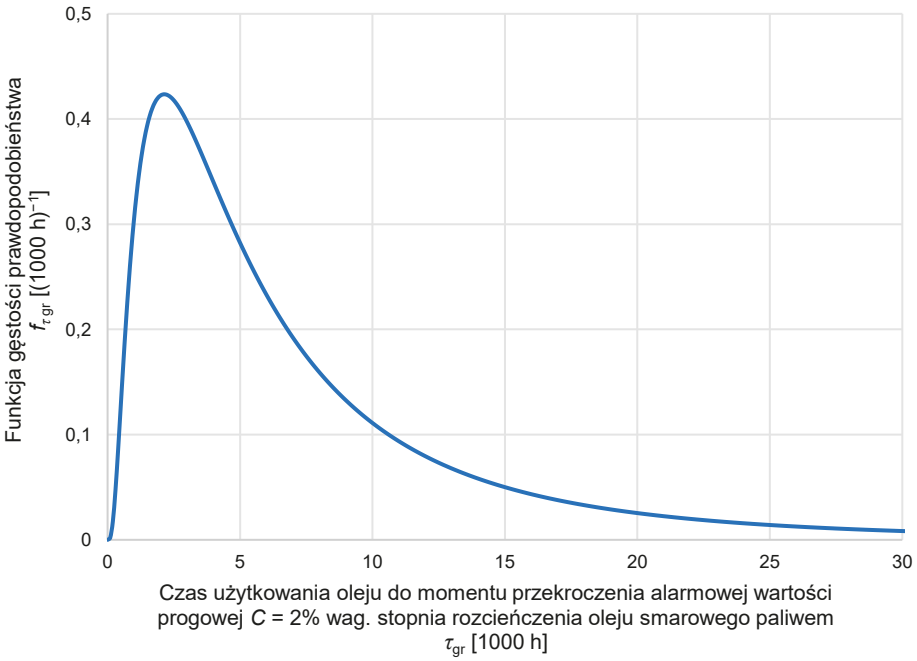
gdzie: $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ – rozkład normalny o średniej μ i wariancji σ^2.

Dla zmiennej $\tau_2 = \tau_{gr}(C_{gr} = 2\%$ wag.) uzyskano parametry: położenia (średnia po transformacji logarytmem naturalnym) $\mu = 7{,}669$ h i rozproszenia (odchylenie standardowe logarytmu danych) $\sigma = 0{,}942$ h, natomiast dla zmiennej v_{1000} odpowiednio $\mu = -0{,}070\%$ wag./1000 h i $\sigma = 0{,}945\%$ wag./1000 h. Wartości statystyki

testowej K–S wyniosły odpowiednio $D = 0{,}089$ oraz $D = 0{,}091$, przy poziomach istotności $p = 0{,}973$ i $p = 0{,}970$.

Ponieważ uzyskane wartości $p >> 0{,}05$, nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o zgodności danych z rozkładem logarytmiczno-normalnym. Wyniki wskazują, że rozkład ten stanowi adekwatny model probabilistyczny dla analizowanych zmiennych.

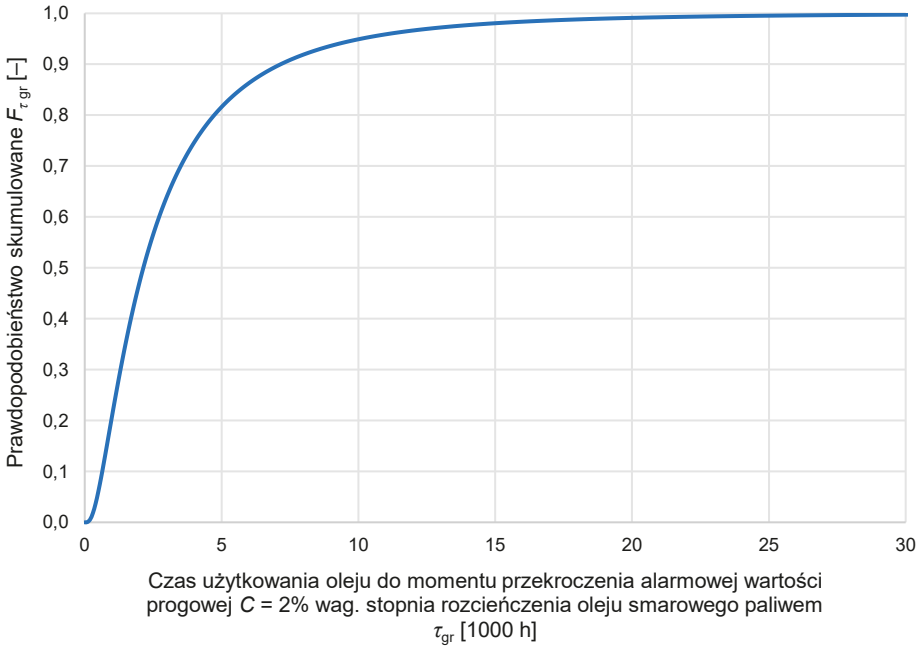
Funkcje gęstości prawdopodobieństwa oraz dystrybuanty rozkładów logarytmiczno-normalnych o oszacowanych parametrach położenia i rozproszenia przedstawiono na rysunkach 4.47–4.50.



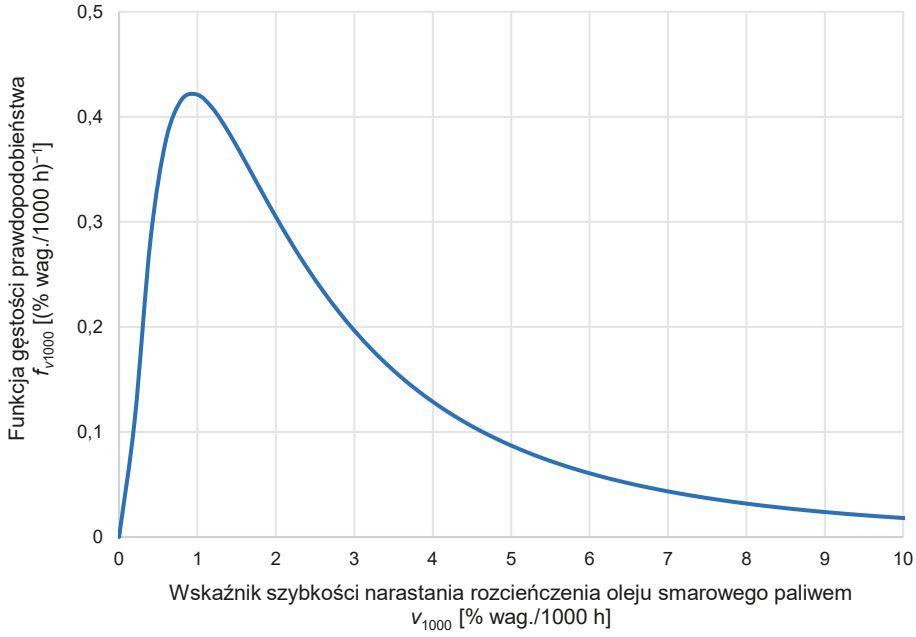
Rys. 4.47. Gęstość prawdopodobieństwa rozkładu wskaźnika τ_2

Teoretyczny rozkład dla zmiennej τ_2 cechuje się średnią 3558 h, medianą 2141 h oraz modą 880 h. Kwartyle przyjmują wartości $Q_1 = 1136$ h oraz $Q_3 = 4032$ h, co daje rozstęp międzykwartylowy równy 2895. Rozkład wykazuje bardzo duże rozproszenie, czego odzwierciedleniem jest odchylenie standardowe równe 4655 h.

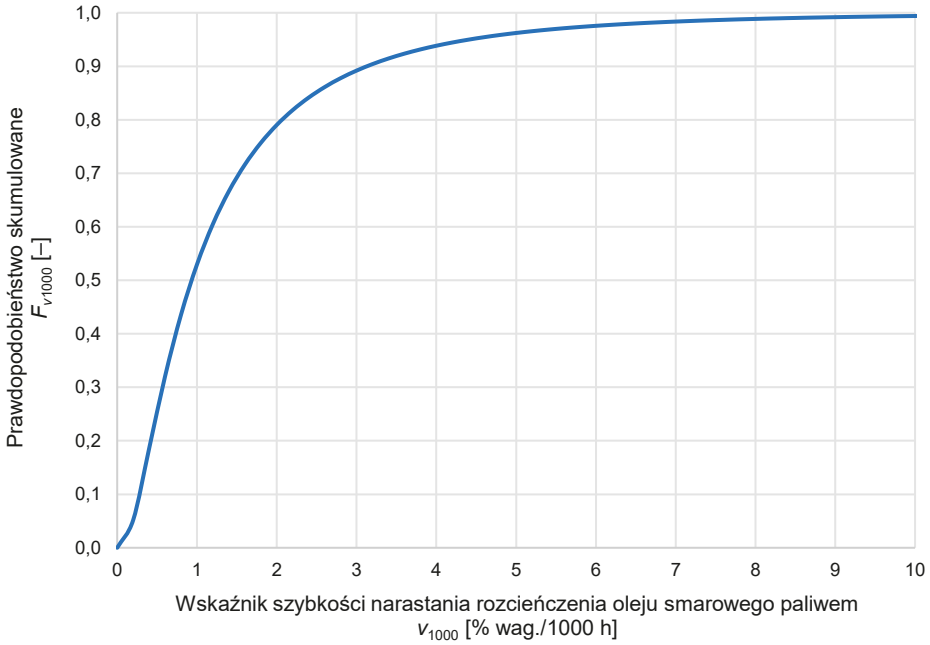
Współczynnik zmienności teoretycznego rozkładu zmiennej τ_2 osiąga 130,8%. Skośność wynosząca 4,8 potwierdza silną asymetrię prawostronną, natomiast kurtoza nadmiarowa równa 59,6 świadczy o bardzo ciężkich ogonach rozkładu i podwyższonym prawdopodobieństwie występowania obserwacji skrajnych.



Rys. 4.48. Dystrybuanta rozkładu wskaźnika τ_2



Rys. 4.49. Gęstość prawdopodobieństwa rozkładu wskaźnika v_{1000}



Rys. 4.50. Dystrybuanta rozkładu wskaźnika v_{1000}

Teoretyczny rozkład wskaźnika v_{1000} ma średnią równą 1,490% wag./1000 h, medianę 0,932% wag./1000 h oraz modę 0,382% wag./1000 h. Połowa obserwacji powinna znajdować się w przedziale od pierwszego kwartylu Q_1 = 0,49% wag/1000 h do trzeciego kwartylu Q_3 = 1,76% wag./1000 h, a rozstęp międzykwartylowy wynosi 1,27% wag./1000 h. Odchylenie standardowe osiąga wartość 1,75% wag./1000 h, co świadczy o znacznym rozproszeniu danych względem średniej.

Współczynnik zmienności wynosi około 117,7%, wskazując na bardzo dużą względną zmienność. Rozkład charakteryzuje się również wysoką skośnością (5,11), oznaczającą długi prawy ogon, oraz bardzo wysoką kurtozą nadmiarową (67,10), co świadczy o dużym prawdopodobieństwie występowania wartości ekstremalnych. Parametry te pokazują, że większość obserwacji skupia się przy niewielkich wartościach zmiennej, natomiast sporadycznie mogą pojawiać się bardzo duże wartości.

4.4.3. Analiza wyników badań z uwagi na model i przeznaczenie silnika

Rozkład statystyczny wartości wskaźników τ_2 i v_{1000} dla przeanalizowanych danych w podziale na model silnika, z którego pobrano próbki oleju, przedstawiono odpowiednio na rysunkach 4.51 i 4.52.

Uzyskane wyniki związane są z różnym stanem technicznym poszczególnych silników. Na szybkość procesu rozcieńczania pośrednio może mieć wpływ ciśnienie maksymalne spalania oraz całkowita powierzchnia płaszczy cylindrowych, jednak ocena szczegółowa wpływu tych czynników wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań. Wyliczone całkowite powierzchnie płaszczy cylindrowych analizowanych silników zestawiono w załączniku Z3.

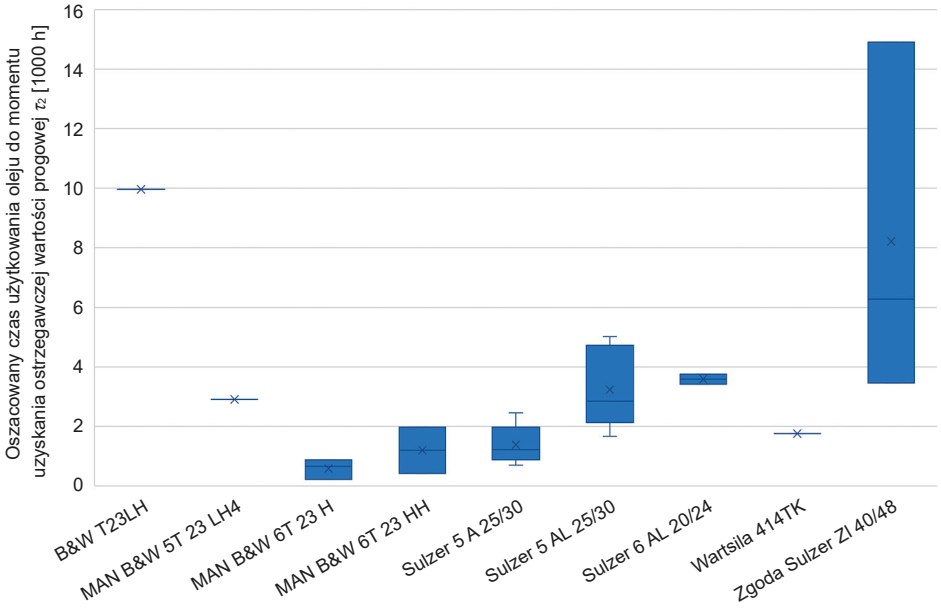
Dla analizowanego zestawu danych najwyższą trwałość eksploatacyjną odnotowano dla silników głównych typu Zgoda Sulzer ZL 40/48 eksploatowanych na oleju Aurelia XT 4040. Wartości $\tau_2 = \tau_{gr}$ (C_{gr} = 2% wag) wyniosły odpowiednio 14 905, 6280 i 3458 h, co jest wynikiem bardzo niskich wartości v_{1000} (0,13–0,58% wag./1000 h). Wskazuje to na wyjątkowo korzystne warunki pracy układu smarowania oraz wysoką odporność oleju na degradację.

Najniższą trwałość oleju dla analizowanego zestawu danych stwierdzono w silnikach MAN B&W 6T23H/HH eksploatowanych na BP Energol DL-MP 30. Minimalna wartość τ_2 wyniosła jedynie 222 h, a odpowiadająca jej wartość v_{1000} osiągnęła maksimum dla całego zbioru danych (8,99% wag./1000 h). Wskazuje to na wyjątkowo szybki proces degradacji środka smarowego i może być wynikiem bardzo złego stanu technicznego silnika, awarii instalacji zasilania paliwem, błędów eksploatacyjnych lub nieprawidłowości podczas pobierania próbek oleju smarowego do analizy.

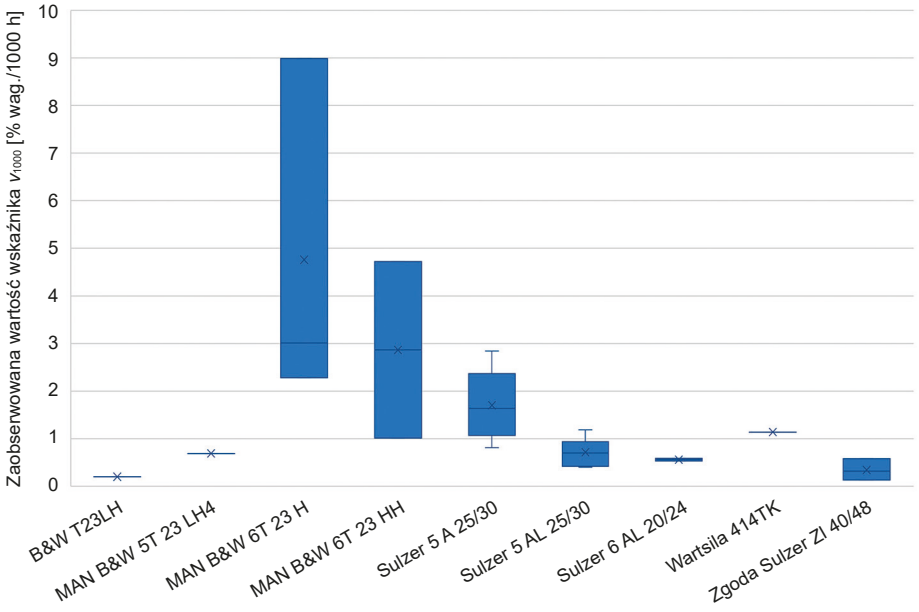
Silniki główne osiągały zdecydowanie korzystniejsze parametry eksploatacyjne niż silniki pomocnicze. Wszystkie trzy przypadki silników głównych znalazły się w grupie o najniższych wartościach v_{1000}, jednak dla uzyskania wiarygodnych danych należałoby przeprowadzić badanie dla większej populacji silników głównych.

W grupie silników pomocniczych najlepszym stanem technicznym charakteryzowały się konstrukcje Sulzera serii AL 25/30. Dla większości obserwacji wartości τ_2 mieściły się w przedziale 2000–5000 h (v_{1000} < 1,0% wag./1000 h).

Najgorszy stan techniczny pośród analizowanych silników wykazały silniki MAN B&W serii 6T23H/HH, gdzie dla tego samego modelu uzyskano wartości τ_2 w przedziale od 222 do 1980 h (v_{1000} w zakresie 1,01 do 8,99% wag./1000 h). Tak szeroki rozrzut sugeruje istotny wpływ warunków eksploatacji, stanu technicznego lub jakości obsługi na proces degradacji oleju.



Rys. 4.51. Wartości wskaźnika τ_2 w podziale na model silnika



Rys. 4.52. Wartości wskaźnika ν_{1000} w podziale na model silnika

4.4.4. Analiza wyników badań z uwagi na zastosowany w silniku olej smarowy

Szybkość procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem zależy od wielu czynników, w szczególności od stanu technicznego silnika oraz warunków jego eksploatacji.

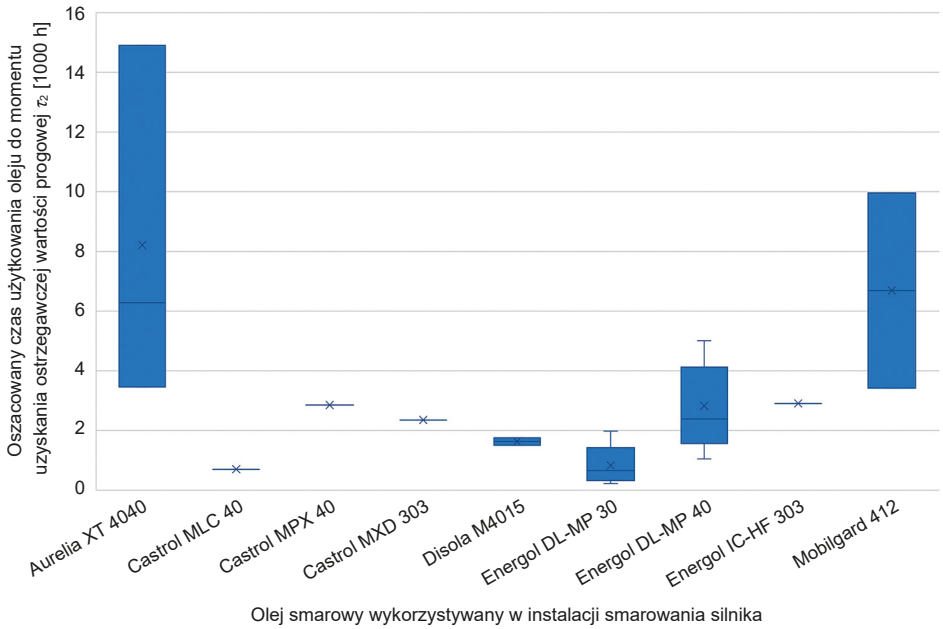
Rozkład statystyczny wartości wskaźników τ_2 i v_{1000} dla przeanalizowanych danych w podziale na rodzaj oleju smarowego w instalacji smarowania silnika, z którego pobrano próbki oleju, przedstawiono odpowiednio na rysunkach 4.53 i 4.54.

Ze względu na znaczną zmienność uzyskanych wyników oraz brak możliwości pełnej kontroli wszystkich czynników wpływających na przebieg procesu, zgromadzony materiał badawczy nie pozwala na jednoznaczne określenie wpływu rodzaju oleju smarowego na zmianę temperatury zapłonu ani na formułowanie uogólnionych wniosków dotyczących wyższości poszczególnych olejów.

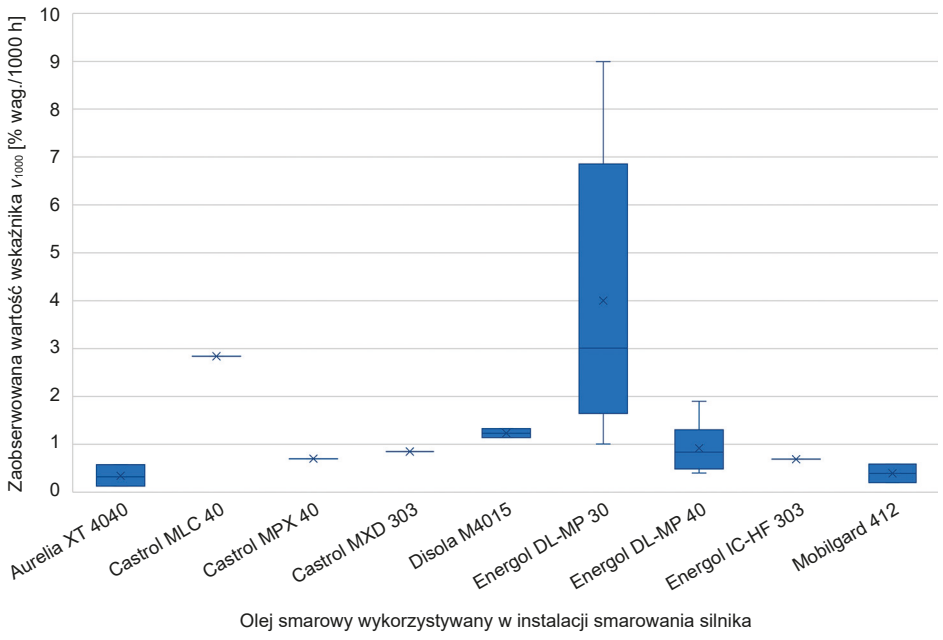
Analiza dostępnych danych wskazuje jednak, że w badanej próbie najwyższe wartości trwałości charakteryzowały przypadki, w których stosowano olej Elf Aurelia XT 4040. Korzystne wartości analizowanych wskaźników odnotowano również dla oleju Mobilgard 412, zarówno w silnikach Sulzer, jak i MAN B&W. Z kolei olej BP Energol DL-MP 40 cechował się relatywnie niewielkim rozrzutem wyników, co może świadczyć o bardziej stabilnym przebiegu procesu rozcieńczania w analizowanych warunkach eksploatacyjnych. W większości obserwacji wartości czasu do osiągnięcia granicznego stopnia rozcieńczenia, τ_2, mieściły się w przedziale od 2000 do 5000 h, natomiast wartości wskaźnika szybkości narastania rozcieńczenia v_{1000} zawierały się najczęściej w zakresie od 0,4 do 1,0% wag./1000 h. Należy jednak podkreślić, że obserwacje te odnoszą się wyłącznie do analizowanego zbioru danych i nie stanowią podstawy do wnioskowania o zależnościach przyczynowo-skutkowych.

Interesującym przypadkiem jest statek „Generał Jasiński", dla którego wykonano trzy pomiary dotyczące tego samego typu silnika i oleju. Dwa wyniki (3926 i 5014 h) były do siebie zbliżone, natomiast trzeci (2126 h) odbiegał znacząco od pozostałych. Może to wskazywać na wystąpienie okresowych niekorzystnych warunków eksploatacji lub pogorszenie stanu technicznego jednostki.

Jeszcze większą zmienność zaobserwowano dla statku „Syn Pułku". Wartości τ_2 zmieniały się od 704 do 2459 h, a v_{1000} od 0,81 do 2,84% wag./1000 h. Oznacza to ponad trzykrotną różnicę trwałości przy tym samym typie silnika, co sugeruje dominujący wpływ czynników eksploatacyjnych nad konstrukcyjnymi.



Rys. 4.53. Wartości wskaźnika τ_2 w podziale na w podziale na oznaczenie handlowe środka smarowego



Rys. 4.54. Wartości wskaźnika v_{1000} w podziale na oznaczenie handlowe środka smarowego

4.4.5. Analiza wyników badań z uwagi na właściwości reologiczne oleju

Właściwości reologiczne olejów mają istotny wpływ na wielkość przecieków w układach tribologicznych i hydraulicznych, ponieważ determinują one zdolność cieczy do utrzymania filmu smarnego oraz jej opór przepływu w warunkach eksploatacyjnych. Im korzystniejsze właściwości lepkościowe oleju, tym mniejsze ryzyko nadmiernych przecieków i utraty efektywności układu.

Z kolei właściwości reologiczne paliwa determinują wielkość przecieków np. w pompach wtryskowych, co może intensyfikować proces rozcieńczania oleju smarowego paliwem w silniku. Dlatego też paliwo wykorzystywane w silniku powinno spełniać wymagane przez producenta specyfikacje i być odpowiednio przygotowane (np. nadmierne podgrzanie paliwa będzie skutkowało spadkiem jego lepkości i zwiększeniem intensywności przecieków paliwa oraz zwiększeniem ryzyka zatarcia elementów par precyzyjnych).

W praktyce inżynierskiej lepkość oleju smarowego w różnych założonych warunkach pracy jest charakteryzowana przez klasę lepkości SAE, stanowi ustandaryzowaną miarę zachowania oleju w określonych warunkach temperaturowych. Kolejnym ważnym parametrem jest wskaźnik lepkości, który z kolei opisuje zmienność lepkości wraz z temperaturą. Klasę SAE pozyskano z charakterystyki dostarczonej przez producenta oleju, natomiast wskaźnik lepkości został wyznaczony na podstawie lepkości kinematycznej oleju w dwóch temperaturach referencyjnych, tj. 40 °C oraz 100 °C. Dzięki temu możliwa była bardziej szczegółowa ocena stabilności właściwości reologicznych oleju w zmiennych warunkach pracy.

Lepkość cieczy zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury. Wskaźnikiem temperaturowej zmienności lepkości powszechnie stosowanym dla olejów smarowych jest empiryczny, bezwymiarowy parametr zwany wskaźnikiem lepkości *VI*. Im wyższa wartość *VI* tym dany olej wykazuje mniejsze zmiany lepkości wraz ze zmianą temperatury. Wartości *VI* świeżych współczesnych jednosezonowych olejów smarowych oscylują ok. 100. Wskaźnik lepkości wyznaczany jest zgodnie z zależnością:

$$VI = \begin{cases} \dfrac{v_L - v_{40}}{v_L - v_H} \cdot 100, & \text{gdy } VI \le 100 \\ 100 + \dfrac{10^{\left(\frac{\log v_H - \log v_{40}}{\log v_{100}}\right)} - 1}{0{,}00715}, & \text{gdy } VI > 100 \end{cases} \tag{4.4}$$

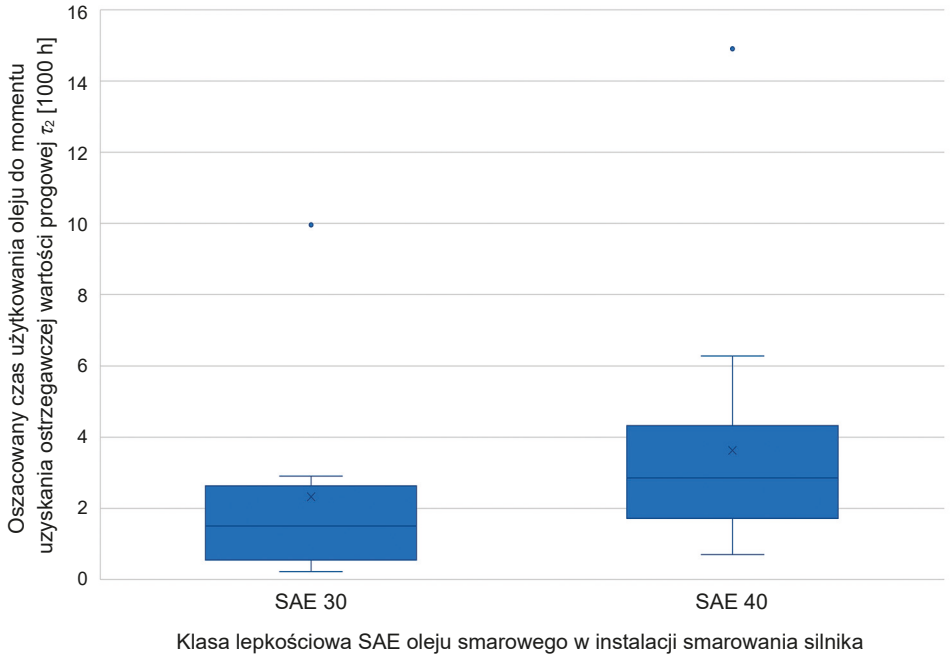
gdzie: v_{40} – lepkość kinematyczna badanego oleju w temperaturze 40 °C, v_{100} – lepkość kinematyczna badanego oleju w temperaturze 100 °C, a v_L i v_H są lepkościami w temperaturze 40 °C dwóch wzorcowych olejów o wartości wskaźnika lepkości równej odpowiednio 0 i 100, które w temperaturze 100 °C mają taką samą lepkość, co badany olej, dla którego wyznaczany jest wskaźnik lepkości.

Wartości v_L i v_H są zamieszczone w tabelach w normie ASTM D2270-10(2016) [103]. Ułatwieniem do wyznaczania wartości *VI* są kalkulatory wskaźnika lepkości dostępne w Internecie m.in. w postaci aplikacji. Do obliczeń *VI* w niniejszym eksperymencie wykorzystano kalkulatory dostępne na stronach firm Olezol oraz Anton Paar [104, 105].

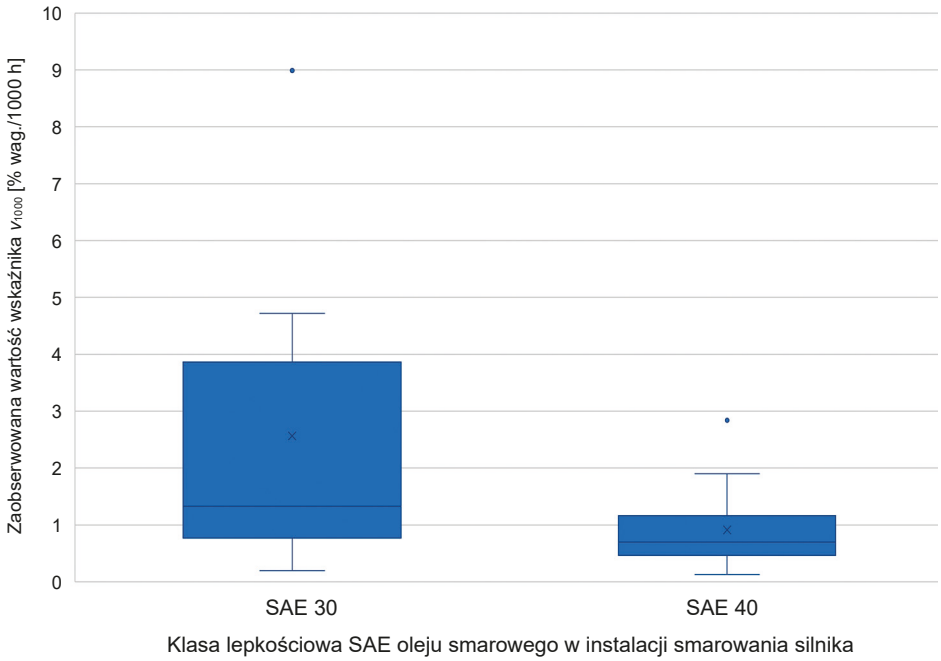
Obliczone wartości wskaźnika lepkości dla olejów smarowych analizowanych w przedstawionym przykładzie aplikacyjnym przedstawiono w załączniku Z4, natomiast wymagania specyfikacji lepkościowej SAE dla olejów silnikowych zawarto w załączniku Z5.

Analiza statystyczna uzyskanych w wyniku analizy przedmiotowych danych badawczych dwóch analizowanych wskaźników τ_2 i v_{1000} w podziale na klasę lepkościową SAE badanych olejów smarowych wykazała wyraźne różnice pomiędzy olejami. Należały one do dwóch zasadniczych klas lepkościowych olejów smarowych wykorzystywanych w instalacjach smarowania silników okrętowych SAE 30 i SAE 40.

Rozkład statystyczny wartości wskaźników τ_2 i v_{1000} dla przeanalizowanych danych w podziale na klasę lepkościową SAE oleju smarowego w instalacji smarowania silnika, z którego pobrano próbki oleju, przedstawiono odpowiednio na rysunkach 4.55 i 4.56.



Rys. 4.55. Wartości wskaźnika τ_2 w podziale na klasę lepkościową SAE oleju smarowego w instalacji smarowania silnika



Rys. 4.56. Wartości wskaźnika v_{1000} w podziale na klasę lepkościową SAE oleju smarowego w instalacji smarowania silnika

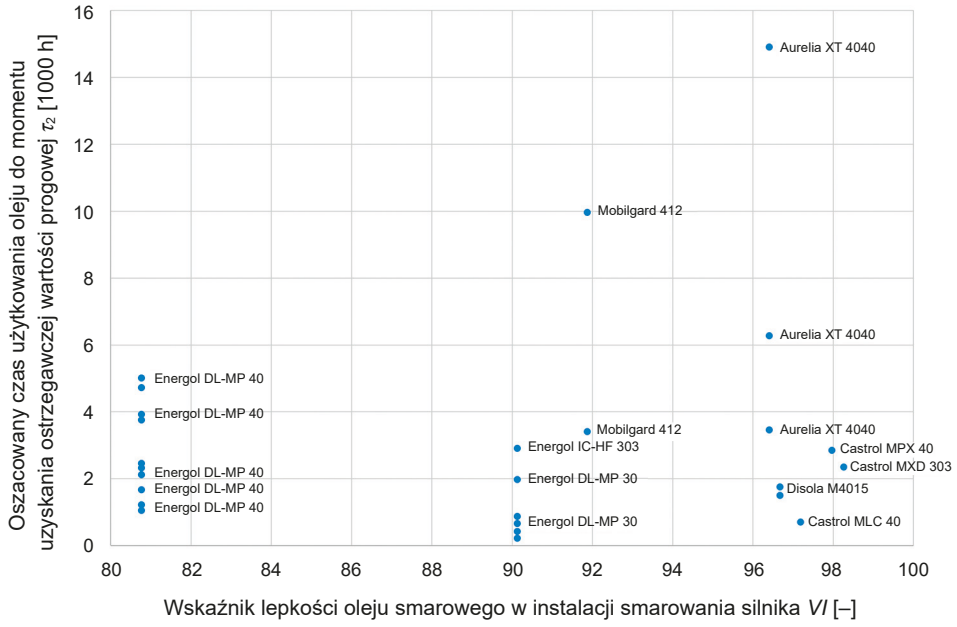
Dla przeanalizowanych silników smarowanych olejami smarowymi przynależnymi do klasy lepkościowej SAE 30 wartości wskaźnika τ_2 charakteryzują się średnią 2486 h oraz medianą 1503 h, przy zakresie od 222 h do 9962 h i odchyleniu standardowym 2970 h. Wskaźnik v_{1000} analizowanych olejów klasy lepkościowej SAE 30 uzyskał wartość średnią 3,03% wag./1000 h, medianę 1,33% wag./1000 h oraz wartości w zakresie od 0,20 do 8,99% wag/1000 h przy odchyleniu standardowym 3,13% wag./1000 h. W obu przypadkach średnie są wyraźnie wyższe od median, co wskazuje na silną prawostronną skośność rozkładów oraz obecność wartości odstających. Szczególnie widoczna jest duża zmienność obu parametrów, co świadczy o mniejszej jednorodności olejów SAE 30. Oba analizowane wskaźniki wykazują istotne rozproszenie danych oraz wpływ pojedynczych ekstremalnych obserwacji na wartości średnie.

Dla olejów klasy lepkościowej SAE 40 wskaźnik τ_2 osiąga wyższą średnią wynoszącą 3766 h (mediana 2854 h), przy zakresie od 704 do 14 905 h oraz odchyleniu standardowym 3141 h. Z kolei wskaźnik v_{1000} przyjmuje wyraźnie niższe i bardziej stabilne wartości – średnia wynosi 0,90% wag./1000 h, mediana 0,81% wag./1000 h, a zakres zmian obejmuje przedział od 0,13 do 2,84% wag./1000 h przy odchyleniu standardowym 0,56% wag./1000 h. Podobnie jak w przypadku olejów smarowych klasy SAE 30, obserwuje się prawostronną skośność rozkładu.

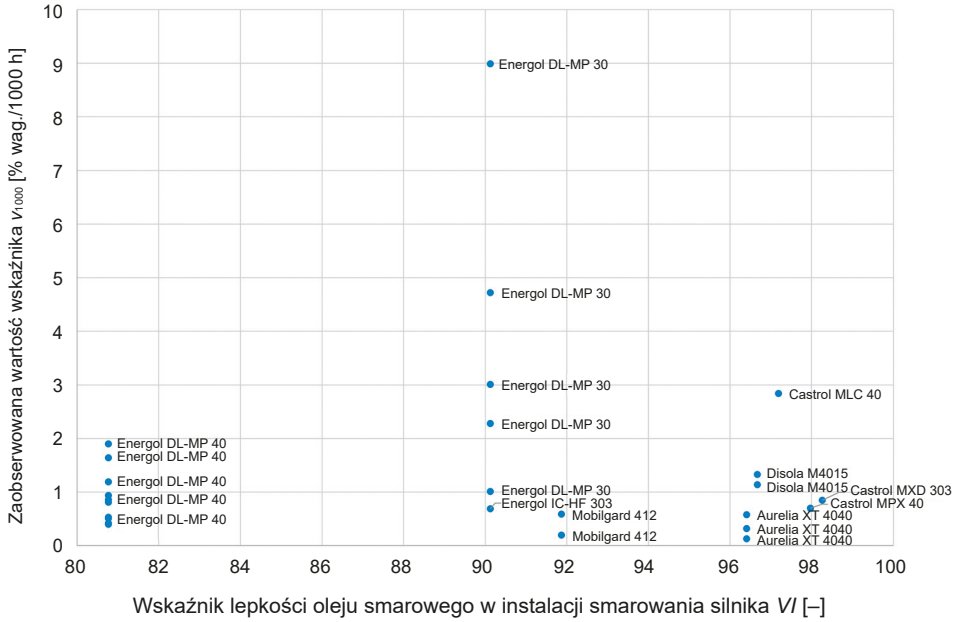
Porównując obie klasy, można stwierdzić, że SAE 40 charakteryzuje się lepszą stabilnością wskaźnika v_{1000}, natomiast SAE 30 wykazuje większą zmienność i obecność wartości ekstremalnych w obu analizowanych wskaźnikach. Analizowane w przykładzie aplikacyjnym oleje smarowe klasy SAE 40 osiągają wyższe wartości czasu do uzyskania ostrzegawczego progu stopnia rozcieńczenia oleju smarowego paliwem równego 2% wag., co wskazuje na korzystniejsze właściwości w tym zakresie, przy zachowaniu większej stabilności lepkościowej.

Jako uzupełnienie do powyższych wyników przeprowadzono analizę zaobserwowanych wartości wskaźników τ_{1000} oraz v_{1000} w zależności od wartości wskaźnika lepkości (*VI*) badanych olejów smarowych. *VI* jest miarą określającą, w jakim stopniu lepkość oleju zmienia się wraz ze zmianą temperatury. Im wyższa wartość VI, tym mniejsza wrażliwość lepkości na temperaturę, co oznacza bardziej stabilne właściwości reologiczne oleju w szerokim zakresie warunków pracy. Oleje o wysokim *VI* charakteryzują się wolniejszym spadkiem lepkości wraz ze wzrostem temperatury, dzięki czemu lepiej utrzymują film smarowy i zapewniają bardziej stabilne warunki pracy układów tribologicznych.

Dla badanych olejów smarowych obliczono wartości *VI*. Wartości wskaźników τ_2 i v_{1000} dla przeanalizowanych danych w funkcji wartości *VI* oleju smarowego w instalacji smarowania silnika, z którego pobrano próbki oleju, przedstawiono odpowiednio na rysunkach 4.57 i 4.58.



Rys. 4.57. Wartości wskaźnika τ_2 w funkcji wskaźnika lepkości oleju smarowego w instalacji smarowania silnika



Rys. 4.58. Wartości wskaźnika ν_{1000} w funkcji wskaźnika lepkości oleju smarowego w instalacji smarowania silnika

Po wstępnej analizie danych dotyczących relacji między wartością wskaźnika lepkości (*VI*) a wartościami wskaźników τ_2 i ν_{1000}, można stwierdzić, że badane oleje charakteryzują się zróżnicowanymi właściwościami reologicznymi zarówno pod względem poziomu wartości, jak i ich zmienności.

W całym zbiorze danych obserwuje się istotne zróżnicowanie wyników, szczególnie w przypadku wskaźnika t_2, który wykazuje wyraźną podatność na występowanie wartości skrajnych, co wpływa na jego rozkład i zwiększa asymetrię.

Zbliżanie się do prawdy to seria
coraz mniejszych precyzyjnych przybliżeń
Isaak Asimov (2.1.1920 – 6.4.1992)

Wszystkie fakty muszą być wzięte pod uwagę,
zanim wyciągnie się ostateczny wniosek
Arthur Conan Doyle (22.5.1859 – 7.7.1930)

5. PODSUMOWANIE

Niniejsza praca wpisuje się w obszar badań nad trwałością i niezawodnością współczesnych jednostek napędowych, stanowiąc próbę usystematyzowania i praktycznego ujęcia problematyki rozcieńczania oleju silnikowego paliwem. Opracowana metoda MORSO, oparta na analizie zmian temperatury zapłonu oleju, stanowi narzędzie wspomagające ocenę stanu eksploatacyjnego oleju oraz podejmowanie decyzji serwisowych w warunkach rzeczywistej eksploatacji silników spalinowych.

W konsekwencji, przedstawione opracowanie stanowi zarówno uporządkowanie dotychczasowej wiedzy w zakresie analizowanego zagadnienia, jak i propozycję praktycznego narzędzia diagnostycznego, które może znaleźć zastosowanie w inżynierii eksploatacji silników spalinowych.

W związku z faktem, że temperatura zapłonu paliwa jest praktycznie zawsze niższa niż temperatura zapłonu oleju napędowego, to przedstawiona metoda może być zastosowana w zasadzie do wszystkich rodzajów paliw ciekłych – olejów napędowych lekkich, średnich i ciężkich – zarówno olejów destylacyjnych, pozostałościowych, jak i mieszanych, a także paliw innych niż węglowodorowe. Obecnie obowiązujące specyfikacje paliw żeglugowych zgodnie z normą ISO 8217:2024 przedstawiono dla paliw destylacyjnych i pozostałościowych odpowiednio w załącznikach Z6 i Z7.

Istotną wartością dodaną przedstawionej analizy byłaby analiza relacji między gatunkami paliw używanych do zasilania analizowanych silników a szybkością rozcieńczania oleju smarowego paliwem, jednak wykorzystane dane badawcze nie zawierały informacji w tym zakresie. Zagadnienie to może stanowić podstawę do realizacji dalszych prac badawczych, zwłaszcza w zakresie wykorzystania paliw niskosiarkowych (VLSF, ULSF), paliw syntetycznych, biopaliw (HVO) oraz paliw zawierających biokomponenty (FAME).

Uzyskane wyniki szczegółowe pozyskane z przykładu aplikacyjnego oraz przedstawione procedury analityczne mogą stanowić podstawę do dalszych prac

badawczych nad doskonaleniem metod diagnostyki olejów smarowych, w szczególności w kierunku ich automatyzacji oraz integracji z systemami monitorowania stanu technicznego silników [106, 107]. Jednocześnie należy podkreślić, że skuteczność opracowanego podejścia zależy od jakości i reprezentatywności danych eksploatacyjnych, co wskazuje na potrzebę dalszych badań w warunkach zróżnicowanych reżimów pracy silników.

Należy również podkreślić, że opracowana metoda MORSO, pomimo swojej uniwersalności i szerokiego zakresu potencjalnych zastosowań, została zweryfikowana w warunkach ograniczonych do określonego zbioru danych eksploatacyjnych, obejmujących wybrane typy silników okrętowych oraz stosowane w nich oleje smarowe. W związku z tym jej dalsza walidacja w innych warunkach eksploatacyjnych, w szczególności dla silników pracujących w zróżnicowanych instalacjach zasilania oraz przy zmiennych obciążeniach dynamicznych, może stanowić ważny kierunek przyszłych badań.

Istotnym obszarem dalszego rozwoju przedstawionego podejścia pozostaje również implementacja zaproponowanych wariantów układów diagnostycznych w formie rzeczywistych systemów monitorowania on-line, co umożliwiłoby bieżącą ocenę stopnia rozcieńczenia oleju smarowego paliwem i analizę dynamiki procesu rozcieńczania w czasie rzeczywistym. Integracja metody z systemami diagnostyki pokładowej lub platformami analitycznymi może w przyszłości zwiększyć jej wartość aplikacyjną oraz przyczynić się do bardziej efektywnego zarządzania eksploatacją silników spalinowych.

W rezultacie, przedstawiona w pracy koncepcja stanowi nie tylko narzędzie analityczne, lecz również punkt wyjścia do dalszego rozwoju metod diagnostyki tribologicznej w kontekście nowoczesnych systemów eksploatacji jednostek napędowych.

Ograniczeniem metody MORSO może być zjawisko odparowania lekkich frakcji paliwa z oleju smarowego, występujące szczególnie podczas długotrwałej pracy silnika w warunkach wysokiego obciążenia cieplnego. Zjawisko to może powodować niedoszacowanie rzeczywistego poziomu rozcieńczenia oleju paliwem i powinno być uwzględniane podczas interpretacji wyników. Dalszy rozwój metody powinien obejmować uwzględnienie wpływu temperatury pracy oleju oraz procesów fizykochemicznych zachodzących podczas eksploatacji silnika.

Należy również wskazać ograniczenia metody MORSO wynikające z zastosowania analizy trendu liniowego. Metoda ta została opracowana do oceny szybkości narastania procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem w warunkach eksploatacyjnych i jest szczególnie przydatna do identyfikacji stopniowych zmian związanych ze zużyciem lub pogarszającym się stanem technicznym elementów silnika. Nie jest ona natomiast przeznaczona do bezpośredniej detekcji nagłych, awaryjnych przecieków paliwa o charakterze skokowym. W takich przypadkach identyfikacja zmiany może nastąpić z opóźnieniem wynikającym z charakteru modelu oraz częstotliwości wykonywania pomiarów.

Z tego względu metoda MORSO powinna być traktowana jako narzędzie wspomagające diagnostykę predykcyjną i ocenę tendencji zmian właściwości oleju smarowego, a nie jako zamiennik istniejących systemów alarmowych i zabezpieczeń silnika. W przyszłości zwiększenie możliwości aplikacyjnych metody może obejmować integrację modelu trendowego z algorytmami wykrywania anomalii oraz kryteriami alarmowymi umożliwiającymi szybszą identyfikację gwałtownych zmian procesu rozcieńczania oleju paliwem.

ZAŁĄCZNIKI

Z1. Dane badawcze
Z2. Wybrane właściwości analizowanych olejów smarowych
Z3. Obliczone wartości powierzchni całkowitej płaszczy cylindrowych analizowanych silników spalinowych
Z4. Obliczone wartości wskaźnika lepkości analizowanych olejów smarowych
Z5. Klasyfikacja lepkościowa silnikowych olejów smarowych zgodnie z normą SAE J300-2021 [108]
Z6. Charakterystyka okrętowych paliw destylacyjnych zgodnie z normą ISO 8217:2024 [74]
Z7. Charakterystyka okrętowych paliw pozostałościowych zgodnie z normą ISO 8217:2024 [74]
Z8. Potwierdzenie zgłoszenia patentowego P.457342

Z1. Dane badawcze

Dane przedstawione w treści rozdziału 1:

- Chybowski, L. *Rozcieńczenie oleju paliwem jako czynnik ryzyka eksplozji w skrzyniach korbowych okrętowych bezwodzikowych silników spalinowych*; Maritime University of Szczecin Press: Szczecin, 2023; ISBN 978-83-64434-56-3.
- Chybowski, L.; Kowalak, P.; Dąbrowski, P. Assessment of the Impact of Lubricating Oil Contamination by Biodiesel on Trunk Piston Engine Reliability. *Energies* **2023**, 16, 5056, doi:10.3390/en16135056, https://www.mdpi.com/1996-1073/16/13/5056 (dostęp 27.6.2026).
- Chybowski, L.; Szczepanek, M.; Gawdzińska, K. Arrhenius Equation for Calculating Viscosity in Assessing the Dilution Level of Lubricating Oil with Diesel Oil – A Case Study of SAE 30 and SAE 40 Grade Marine Lubricating Oils. *Energies* **2024**, 17, 444, doi:10.3390/en17020444, https://www.mdpi.com/1996-1073/17/2/444 (dostęp 27.6.2026).

Dane przedstawione w treści rozdziału 2:

- Chybowski, L. *Lube oil—diesel oil mixes-dataset*. Mendeley Data, 2022, Ver. 3, DOI: 10.17632/scbx3h2bmf.3,
- https://data.mendeley.com/datasets/scbx3h2bmf/3 (dostęp 27.6.2026).
- Chybowski, L. Study of the Relationship between the Level of Lubricating Oil Contamination with Distillation Fuel and the Risk of Explosion in the Crankcase of a Marine Trunk Type Engine. *Energies* **2023**, 16, 683, doi:10.3390/en16020683.
- Chybowski, L.; Szczepanek, M.; Sztangierski, R.; Brożek, P. Modeling of Selected Parameters of Used Lubricating Oil Diluted with Diesel Oil Using the Characteristics of Fresh Lubricating Oil. *Energies* **2024**, 17, 2047, doi:10.3390/en17092047, https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/683 (dostęp 27.6.2026).

Dane przedstawione w treści rozdziału 4:

- Krupowies, J. *Badania zmian parametrów fizykochemicznych silnikowych olejów smarowych eksploatowanych na statkach polskiej żeglugi morskiej*; Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie: Szczecin, 1996.
- Krupowies, J. *Badania zmian właściwości oleju obiegowego okrętowych silników pomocniczych*; Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie: Szczecin, 2002.
- S&P Sea-web Ships, https://maritime.ihs.com/ (dostęp 27.6.2026).

Z2. Wybrane właściwości analizowanych olejów smarowych

Nazwa oleju	Klasa lepkościowa SAE	Lepkość kinematyczna v [mm^2/s] w temperaturze		Temperatura zapłonu t_{FP} [°C]		Charakterystyka
		40 °C	100 °C	Tygiel otwarty	Tygiel zamknięty	
Agip Cladium 120 SAE 30 CD/CF (Eni Agip)	30	108	12,0	225	180	Olej obiegowy do wolnossących i wysokodoładowanych silników zasilanych olejami napędowymi o pogorszonych właściwościach
Agip Cladium 120 SAE 40 CD/CF (Eni Agip)	40	160	15,7	225	178	
BP Energol DL-MP 30	30	110	11,5	~224	210	Olej obiegowy do silników bezwodzikowych pracujących na lekkim oleju napędowym
BP Energol DL-MP 40	40	160	14,0	~221	210	
BP Energol IC-HF 303	30	110	11,5	230	210	Olej obiegowy do silników bezwodzikowych pracujących na ciężkim oleju napędowym
Castrol MLC 40	40	139	14,0	240	210–214	Olej obiegowy, silniki wodzikowe i bezwodzikowe pracujące w trudnych warunkach
Castrol MPX 40	40	138	14,0	225	210	Olej obiegowy, silniki wodzikowe i bezwodzikowe, sprężarki, przekładnie itp.
Castrol MXD 303	30	103	11,5	220	200–210	Olej obiegowy średnioalkaliczny, silniki bezwodzikowe zasilane ciężkimi olejami napędowymi
Elf Aurelia XT 4040	40	140	14,0	245	210–215	Olej obiegowy średnioalkaliczny, silniki bezwodzikowe zasilane ciężkimi olejami napędowymi
Elf Disola M4015	40	150	14,7	250	200	Olej obiegowy, silniki wodzikowe i bezwodzikowe, sprężarki, przekładnie itp.
Mobil Mobilgard 412	40	152	~14,4	227	210	Olej obiegowy do silników bezwodzikowych zasilanych lekkimi olejami napędowymi
Orlen Marinol CB-30 RG 1230	30	110	11,7	240	216	
Orlen Marinol CB-30 RG 1230 (Orlen) – olej zużyty z silnika Sulzer 5 BAH 22	30	102	11,4	b.d.	190	

b.d. – brak danych

Z3. Obliczone wartości powierzchni całkowitej płaszczy cylindrowych analizowanych silników spalinowych

Model silnika	Przyjęte do obliczeń wartości charakteryzujące objętość skokową silnika			Całkowita powierzchnia płaszczy cylindrowych
	Średnica cylindra	Skok tłoka	Liczba cylindrów	
	D [m]	S [m]	i_{cyl} [–]	A_t [m^2]
B&W 5T23LH4	0,20	0,30	5	0,0471
B&W T23LH	0,20	0,30	6	0,0565
MAN B&W 5T 23 LH4	0,20	0,30	5	0,0471
MAN B&W 6T 23 H	0,20	0,30	6	0,0565
MAN B&W 6T 23 HH	0,20	0,30	6	0,0565
Sulzer 5 A 25/30	0,25	0,30	5	0,0736
Sulzer 5 AL 25/30	0,25	0,30	5	0,0736
Sulzer 6 AL 20/24	0,20	0,24	6	0,0452
Sulzer Zl 40/48	0,40	0,48	6	0,3619
Wärtsilä 414TK	0,14	0,14	8	0,0172

Z4. Obliczone wartości wskaźnika lepkości analizowanych olejów smarowych

Producent oleju	Nazwa handlowa oleju smarowego	Przyjęte do obliczeń wartości lepkości kinematycznej		Obliczony wskaźnik lepkości
		ν40 [mm2/s]	ν100 [mm2/s]	VI [–]
Elf	Aurelia XT 4040	140	14,0	96,40
Castrol	Castrol MLC 40	139	14,0	97,19
Castrol	Castrol MPX 40	138	14,0	97,97
Castrol	Castrol MXD 303	103	11,5	98,26
Elf	Disola M4015	150	14,7	96,67
BP	Energol DL-MP 30	110	11,5	90,13
BP	Energol DL-MP 40	160	14,0	80,77
BP	Energol IC-HF 303	110	11,5	90,13
Mobil	Mobilgard 412	152	14,4	91,87

Z5. Klasyfikacja lepkościowa silnikowych olejów smarowych zgodnie z normą SAE J300-2021 [108]

Parametr [b]		Niskotemperaturowa, rozruchowa lepkość dynamiczna [mPa·s] [a] w temperaturze [°C]	Niskotemperaturowa lepkość dynamiczna zapewniająca pompowalność [mPa·s] [a] w temperaturze [°C]	Lepkość kinematyczna [mm^2/s] [a] w 100 °C	Lepkość kinematyczna [mm^2/s] [a] w 100°C	Lepkość dynamiczna [mPa·s] [a] w 150 °C
Limit		Max.	Max. przy braku naprężeń plastycznych	Min.	Max.	Min.
Metody testowe i źródła		ASTM D5293-20 [109][c]	ASTM D4684-20a [110] [d]	ASTM D445-21e1 [111] or ASTM D7042-21a [112] [e]	ASTM D445-21e1 [111] or ASTM D7042-21a [112] [e]	ASTM D4683-20 [113], ASTM D4741-21 [114], ASTM D5481-21 [115] lub CEC L-36-90 [116]
Klasa lepkościowa SAE	0W	6200 w −35 °C	60 000 w −40 °C	3,8	–	–
	5W	6600 w −30 °C	60 000 w −35 °C	3,8	–	–
	10W	7000 w −25 °C	60 000 w −30 °C	4,1	–	–
	15W	7000 w −20 °C	60 000 w −25 °C	5,6	–	–
	20W	9500 w −15 °C	60 000 w −20 °C	5,6	–	–
	25W	13 000 w –10 °C	60 000 w –15 °C	9,3	–	–
	8	–	–	4,0	< 6,1	1,7
	12	–	–	5,0	< 7,1	2,0
	16	–	–	6,1	< 8,2	2,3
	20	–	–	6,9	< 9,3	2,6
	30	–	–	9,3	< 12,5	2,9
	40	–	–	12,5	< 16,3	3,5 (klasy 0W-40, 5W-40, 10W-40)
	40	–	–	12,5	< 16,3	3,7 (klasy 15W-40, 20W-40, 25W-40, 40)
	50	–	–	16,3	< 21,9	3,7
	60	–	–	21,9	< 26,1	3,7

[a] 1 mPa·s = 1 cP; 1 mm^2/s = 1 cSt.

[b] Wszystkie wartości, za wyjątkiem lepkości rozruchowej w niskiej temperaturze, są specyfikacjami krytycznymi określonymi przez normę ASTM D3244-21a [117].

[c] ASTM D5293-20 [109]: lepkość rozruchowa – Należy stosować niekrytyczny protokół specyfikacji wskazany w normie ASTM D3244-21a [117] przy wartości prawdopodobieństwa testowego *P* równej 0,95.

[d] ASTM D4684-20a [110]: należy zauważyć, że obecność jakiejkolwiek granicy plastyczności wykrywanej tą metodą stanowi niespełnienie tego wymagania niezależnie od wartości lepkości.

[e] Błąd przy zastosowaniu norm ASTM D445-21e1 [111] lub ASTM D7042-21a [112] powinien być skorygowany zgodnie z normą ASTM D445-21e1 [111].

Z6. Charakterystyka okrętowych paliw destylacyjnych zgodnie z normą ISO 8217:2024 [74]

Parametr	Limit	Kategoria ISO-F-							Metody testowe
		DMX	DMA	DFA	DMZ	DFZ	DMB	DFB	
Wymagania ogólne		Klauzule nr 5 do 10 wskazane w normie							
Lepkość kinematyczna w 40 °C [mm^2/s] [a]	Max.	5,500	6,000				11,00		ISO 3104
	Min.	1,400	2,000		3,000		2,000		
Gęstość w 15 °C [kg/m^3]	Max.	–	890,0				900,0		**ISO 3675** lub **ISO 12185**
Wskaźnik cetanowy [–]	Min.	45,0	40,0	–	40,0	–	35,0	–	ISO 4264
Liczba cetanowa [–]	Min	–	–	40,0	–	40,0	–	35,0	**ISO 5165** lub ASTM D6890/EN 15195 lub ASTM D7668/EN 16715 lub ASTM D8183/EN 17155
Zawartość siarki [% wag.]	Max.	Regulowane przepisami [b]							ISO 8754 lub ISO 14596 lub **ASTM D4294**
Temperatura zapłonu [°C]	Min.	43,0	60,0						ISO 2719 Procedura A (B100 – procedura C)
Zawartość siarkowodoru [mg/kg]	Max.	2,00							IP 570
Liczba kwasowa [mg KOH/g]	Max.	0,5							ASTM D664 Procedura B
Osad całkowity [% wag.]	Max.	–					0,10 [c]		ISO 10307-1
Stabilność oksydacyjna [g/m^3]	Max.	25	25	–	25	–	25 [d]	–	ISO 12205
Stabilność oksydacyjna [h]	Min.	–	–	8,0	–	8,0	–	8,0	EN 15751
Zawartość FAME [% wag. lub% obj.]	–	Śladowa	Śladowa	Raport [e]	Śladowa	Raport [e]	Śladowa	Raport [e]	ASTM D7963 lub **EN 14078**/ASTM D7371
Dolna wartość opałowa [MJ/kg]	–	–	–	Raport [f]	–	Raport [f]	–	Raport [f]	ASTM D240
Pozostałość po koksowaniu z 10% pozostałości po destylacji (mikro-węgiel) [% wag.]	Max.	0,30					–		ISO 10370

Parametr	Limit	Kategoria ISO-F-							Metody testowe
		DMX	DMA	DFA	DMZ	DFZ	DMB	DFB	
Pozostałość po koksowaniu (mikrowęgiel) [% wag.]	Max.	–					0,30		ISO 10370
Punkt mętnienia [°C] [g]	Max.	–16	Raport [f]				– [h]	Raport [f,h]	ISO 3015
Temperatura blokady filtra zimnego [c] [g]	–	–	Raport [f]				– [h]	Raport [f,h]	EN 116 lub EN 16329
Temperatura płynięcia (górna) [°C] [g]	Max. zima	–	–6				0		ISO 3016
	Max. lato	–	0				6		
Wygląd	–	Jasny i przejrzysty [i]					[c]		Ocena wizualna
Zawartość wody [% obj.]	Max.	–					0,30 [c]		ISO 3733
Zawartość popiołu [% wag.]	Max.	0,010							ISO 6245
Smarność WSD w 60 °C [µm] [j]	Max.	520					520 [d]		ISO 12156-1

W przypadku możliwego do zastosowania więcej niż jednej metody testowej dla FAME i mieszanin paliw zawierających FAME metodami referencyjnymi są metody oznaczone **pogrubioną czcionką**.

[a] 1 mm^2/s = 1 cSt.

[b] Niezależnie od podanych limitów, kupujący paliwo określa maksymalną zawartość siarki zgodnie z odpowiednimi ograniczeniami ustawowymi.

[c] Jeżeli próbka nie jest przejrzysta i jasna, wymagane jest zbadanie całkowitego osadu metodą sączenia na gorąco i badań zawartości wody.

[d] Jeżeli próbka nie jest przejrzysta i jasna, test nie może być przeprowadzony, co uniemożliwia określenie czy wartość mieści się w wymaganym zakresie.

[e] Sprzedawca powinien przedstawić raport dotyczący oznaczonej zawartości FAME zgodnie ze wskazanymi metodami lub w odniesieniu do udziału dla mieszanin (z wskazaniem, czy mowa o zawartości w udziale wagowym czy objętościowym.

[f] Wartość określona z wykorzystaniem wskazanych metod powinna zostać zaraportowana.

[g] Temperatura płynięcia (pour point) nie może zagwarantować zdolności eksploatacyjnej dla wszystkich statków we wszystkich warunkach klimatycznych. Kupujący powinien potwierdzić, że właściwości przepływu w niskich temperaturach (temperatura płynięcia, mętnienia i blokady zimnego filtra) są odpowiednie dla konstrukcji statku oraz planowanej trasy rejsu.

[h] W przypadku niektórych produktów test ten może nie działać ze względu na ich wygląd, dlatego należy rozważyć inne środki oceny użyteczności produktu.

[i] Jeżeli próbka jest barwiona i nieprzezroczysta, zawartość wody nie może przekraczać 200 mg/kg zgodnie z normą ISO 12937.

[j] Wymóg ten ma zastosowanie do paliw o zawartości siarki poniżej 500 mg/kg (0,050% wag.).

Z7. Charakterystyka okrętowych paliw pozostałościowych zgodnie z normą ISO 8217:2024 [74]

Parametr	Limit	Kategoria ISO-F-					Metody testowe i źródła
		RF20	RF80	RF180	RF380	RF500	
Wymagania ogólne		Klauzule nr 5 do 10 przedstawione w normie					
Lepkość kinematyczna w 50 °C [mm^2/s] [a, b]	Max.	20,00	80,00	180,0	380,0	500,0	ISO 3104
	Min.	2,000 [c]	20,00	80,00	120,0	380,0	
Gęstość w 15 °C [kg/m^3]	Max.	955,0	991,0			1010,0	**ISO 3675** lub **ISO 12185**
Obliczeniowy wskaźnik aromatyczności węgla CCAI [–]	Max.	860	870				Formuła oparta na gęstości i lepkości kinematycznej
Zawartość siarki [% wag.]	Max.	Regulowane przepisami [d]					ISO 8754 lub ISO 14596 lub **ASTM D4294** lub **ASTM D2622**
Temperatura zapłonu [°C]	Min.	60					ISO 2719 Procedura B
Zawartość siarkowodoru [mg/kg]	Max.	2,00					IP 570
Liczba kwasowa (mg kOH/g)	Max.	2,5					ASTM D664 Procedura B
Pozostałość po koksowaniu (mikrowęgiel) [% wag.]	Max.	10,00	15,00		18,00	20,00	ISO 10370
Temperatura płynięcia (górna) [e]	Max.	6	30				ISO 3016
Zawartość wody [% obj.]	Max.	0,30	0,50				ISO 3733
Zawartość popiołu [% wag.]	Max.	0,070	0,100			0,150	ISO 6245
Zawartość wanadu [mg/kg]	Max.	150	350			450	**IP 501** lub IP 470 lub ISO 10478
Zawartość sodu [mg/kg]	Max.	50	100				**IP 501** lub IP 470
Zawartość sumaryczna glinu i aluminium [mg/kg]	Max.	40	60				**IP 501** lub IP 470 lub ISO 10478

Parametr	Limit	Kategoria ISO-F-					Metody testowe i źródła
		RF20	RF80	RF180	RF380	RF500	
Zawartość oleju zużytego smarowego (ULO) niepoddanego rafinacji [mg/kg]	–	(Ca > 30 oraz Zn > 15) lub (Ca > 30 oraz P >15)					**IP 501** lub IP 470 lub IP 500
Osad całkowity potencjalny TSP [% wag.]	Max.	0,10 [f]					ISO 10307-2 Procedura A
Osad całkowity przyśpieszony TSA [% wag.]	–	Raport [g]					ISO 10307-2 Procedura B
Osad całkowity istniejący TSE [% wag.]	–	Raport [g]					ISO 10307-1
Zawartość FAME [% wag.]	–	Raport [h]					**ASTM D7963** lub **IP 631**
Dolna wartość opałowa [MJ/kg]	–	Raport [g]					ASTM D240

W przypadku możliwego do zastosowania więcej niż jednej metody testowej dla FAME i mieszanin paliw zawierających FAME metodami referencyjnymi są metody oznaczone **pogrubioną czcionką**.

[a] Należy podać rzeczywistą lepkość paliwa magazynowanego na statku. W przypadku paliw o wysokiej temperaturze płynięcia wartość tę można obliczyć, pod warunkiem, że znane są lepkości kinematyczne w dwóch temperaturach.

[b] 1 mm^2/s = 1 cSt.

[c] W przypadku paliw o lepkości w zakresie od 2 mm^2/s do 5 s należy zweryfikować spełnienie minimalnych wymagań silnika w odniesieniu do specyfikacji oryginalnej.

[d] Kupujący paliwo określa maksymalną zawartość siarki zgodnie z odpowiednimi ograniczeniami ustawowymi.

[e] Kupujący powinien potwierdzić, że ta temperatura płynięcia jest odpowiednia dla przewidywanego obszaru eksploatacji statku.

[f] Limit ten dotyczy wyłącznie próbki badawczej o masie 10 g. Brak zakończenia filtracji w ciągu 25 minut oznacza, że paliwo nie spełnia wymagań specyfikacji.

[g] Wartość określona z wykorzystaniem wskazanych metod powinna zostać zaraportowana.

[h] Sprzedawca powinien przedstawić raport dotyczący oznaczonej zawartości FAME zgodnie z wskazanymi metodami lub w odniesieniu do udziału dla mieszanin (z wskazaniem, czy mowa o zawartości w udziale wagowym czy objętościowym.

Z8. Potwierdzenie zgłoszenia patentowego P.457342

URZĄD PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ POLSKIEJ

al. Niepodległości 188/192
00-950 Warszawa, skr. poczt. 203
tel.: (+48) 22 579 05 55 | fax: (+48) 22 579 00 01
e-mail: kontakt@uprp.gov.pl | www.uprp.gov.pl

Kancelaria Ogólna

Warszawa, 2026-10-14

Nasz znak: POTWIERDZENIE/1558359/P.457342
Wasz znak: ZDI/135/2026

POTWIERDZENIE

Urząd Patentowy RP stwierdza, że dnia 2026-10-14 przyjęto w formie elektronicznej wniosek o udzielenie patentu na wynalazek:

Sposób oceny stanu oleju smarowego w silnikach spalinowych i układ do oceny stanu oleju smarowego w silnikach spalinowych

Zgłoszenie oznaczono numerem: **P.457342**

[WIPO ST 10/C PL457342]

Zgłaszający: **POLITECHNIKA MORSKA W SZCZECINIE, Szczecin, Polska**

Dokument wystawiony automatycznie przez system teleinformatyczny UPRP.

Pouczenie:

1. Strony oraz ich przedstawiciele i pełnomocnicy mają obowiązek zawiadomić Urząd o każdej zmianie swojego adresu. W razie zaniedbania tego obowiązku doręczenie pisma pod dotychczasowym adresem ma skutek prawny (art. 41 kpa).
2. O zgłoszeniu wynalazku Urząd Patentowy dokonuje ogłoszenia niezwłocznie po upływie 18 miesięcy od daty pierwszeństwa do uzyskania patentu. Zgłaszający może w okresie 12 miesięcy od daty pierwszeństwa złożyć wniosek o dokonanie ogłoszenia w terminie wcześniejszym (art. 43 ustawy z dnia 30 czerwca 2000r. Prawo własności przemysłowej (Dz. U. z 2021 r. poz. 324).
3. W korespondencji należy powoływać się na nr P.457342.

Klauzula informacyjna:
Zgodnie z art. 13 ust. 1 i 2 Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/679 z dnia 27 kwietnia 2016 r. w sprawie ochrony osób fizycznych w związku z przetwarzaniem danych osobowych i w sprawie swobodnego przepływu takich danych oraz uchylenia dyrektywy 95/46/WE (dalej RODO) Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej informuje, że:

1. Administratorem Pani/Pana danych osobowych jest Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej z siedzibą w Warszawie, adres: al. Niepodległości 188/192, 00-950 Warszawa, skrytka pocztowa 203;
2. Inspektor Ochrony Danych, dane kontaktowe: adres: al. Niepodległości 188/192, 00-950 Warszawa, tel. bezpośredni (022) 579 00 25, fax (022) 579 00 01, e-mail: iod@uprp.pl;
3. Pani/Pana dane osobowe przetwarzane będą w celu realizowania zadań Urzędu Patentowego RP określonych przepisami ustawy z dnia 30 czerwca 2000 r. Prawo własności przemysłowej;
4. Podstawą prawną przetwarzania Pani/Pana danych osobowych jest ustawa z dnia 30 czerwca 2000 r. Prawo własności przemysłowej, rozporządzenia wykonawcze do ww. ustawy, umowy międzynarodowe oraz art. 6 ust. 1 lit. c RODO;

5. Pani/Pana dane osobowe mogą być przekazywane do podmiotów publicznych na zasadach obowiązujących w przepisach prawa oraz organizacjom międzynarodowym i organom unijnym, zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa i umowami międzynarodowymi, po upływie terminów zastrzeżonych dla nieujawniania informacji o zgłoszeniu;
6. Pani/Pana dane osobowe będą przechowywane przez okres zgodny z zasadami archiwizacji dokumentów w Urzędzie Patentowym RP;
7. Posiada Pani/Pan prawo żądania dostępu do treści swoich danych osobowych, prawo ich sprostowania oraz prawo do
8. Przysługuje Pani/Panu prawo wniesienia skargi do organu nadzorczego właściwego w zakresie ochrony danych osobowych gdy uzna Pani/Pan, że przetwarzanie Pani/Pana danych osobowych narusza przepisy RODO;
9. Podanie przez Panią/Pana danych osobowych jest wymogiem ustawowym niezbędnym do dalszego procedowania przez Urząd Patentowy RP.

UWAGA NA OSZUSTÓW!

Przed dokonaniem jakiejkolwiek opłaty do Urzędu Patentowego RP, sprawdź czy numer rachunku zgadza się z numerem konta Urzędu:

NBP O/O Warszawa: 93 1010 1010 0025 8322 3100 0000

Urząd Patentowy RP posiada tylko jeden numer rachunku i pobiera opłaty wyłącznie w złotych!

W przypadku jakichkolwiek wątpliwości prosimy o kontakt z Centrum Informacji w Urzędzie Patentowym RP pod nr tel.: 22 579 05 55. Aktualne ostrzeżenia o próbach wyłudzeń publikowane są na stronach Urzędu Patentowego RP (uprp.gov.pl) oraz w komunikatach FinCERT.pl - Bankowego Centrum Cyberbezpieczeństwa Związku Banków Polskich (zbp.pl).

W celu weryfikacji autentyczności korespondencji zeskanuj podany kod QR lub przejdź na stronę weryfikacji korespondencji Urzędu Patentowego RP dostępnej pod adresem **https://pue.uprp.gov.pl/public/stamp/verify** i przepisz kod stempla.

Kod stempla: c1f-fa62-f68

SPIS RYSUNKÓW

2.1. Przykładowe uszkodzenia i ślady zużycia elementów silników spalinowych spowodowane pogorszeniem właściwości smarnych oleju silnikowego na skutek jego rozcieńczenia paliwem 22
2.2. Metody wykrywania rozcieńczenia oleju smarowego paliwem 26
2.3. Rozwój aparatów Pensky'ego–Martensa od instrumentu manualnego do automatycznego 36
2.4. Aparat Flashpoint Pensky–Martens Semi-Automatic firmy Walter Herzog GmbH wykorzystany w badaniu 37
2.5. Zmienność powtarzalności r_t, odtwarzalności R_t i niepewności u pomiaru temperatury zapłonu dla rozpatrywanych w pracy wartości t_{FP} 38
3.1. Rozkład wartości współczynnika determinacji dla modeli opracowanych przy analizie przypadku aplikacyjnego 43
3.2. Zależność między stopniem rozcieńczenia oleju smarowego lekkim olejem napędowym a temperaturą zapłonu olejów smarowych klas lepkościowych SAE 30 i SAE 40 44
3.3. Zależność między stopniem rozcieńczenia oleju smarowego lekkim olejem napędowym a temperaturą zapłonu zużytego i świeżego oleju smarowego klasy lepkościowej SAE 30 45
3.4. Zależność między stopniem rozcieńczenia oleju smarowego lekkim olejem napędowym a temperaturą zapłonu zmierzoną metodami Clevelanda i Pensky'ego–Martensa 47
3.5. Reprezentacja stanów granicznych oleju smarowego 50
3.6. Algorytmiczna reprezentacja zaproponowanej metody MORSO oceny szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem 52
3.7. Wariant I realizacji systemu diagnostycznego oparty o klasyczny model regresyjny w architekturze klient–serwer 55
3.8. Wariant II realizacji systemu diagnostycznego oparty o model adaptacyjny z przetwarzaniem strumieniowym 57
3.9. Wariant III realizacji systemu diagnostycznego jako system wielosilnikowy z centralnym serwerem analitycznym i mobilnym pozyskiwaniem danych 58
4.1. Przyjęty Sposób przetwarzania danych laboratoryjnych 61
4.2. Czas pracy badanych olejów silnikowych wykorzystany w analizie 65

4.3. Czas pracy badanych olejów silnikowych wykorzystany w analizie w podziale na lokalizację silnika, z którego pobrano próbkę 66
4.4. Liczba próbek badanych olejów silnikowych wykorzystana w analizie 67
4.5. Liczba próbek badanych olejów silnikowych wykorzystana w analizie w podziale na lokalizację silnika, z którego pobrano próbkę 67
4.6. Czas pracy badanych olejów silnikowych wykorzystany w analizie w podziale na oznaczenie handlowe środka smarowego 68
4.7. Liczba próbek badanych olejów silnikowych wykorzystana w analizie w podziale na oznaczenie handlowe środka smarowego 69
4.8. Czas pracy badanych olejów silnikowych wykorzystany w analizie w podziale na producenta oleju smarowego 70
4.9. Liczba próbek badanych olejów silnikowych wykorzystana w analizie w podziale na producenta oleju smarowego 70
4.10. Czas pracy badanych olejów silnikowych wykorzystany w analizie w podziale na klasę lepkościową SAE oleju smarowego 71
4.11. Liczba próbek badanych olejów silnikowych wykorzystana w analizie w podziale na klasę lepkościową SAE oleju smarowego 72
4.12. Czas pracy badanych olejów silnikowych wykorzystany w analizie w podziale na model silnika, z którego pobrano próbkę oleju smarowego 72
4.13. Liczba próbek badanych olejów silnikowych wykorzystana w analizie w podziale na model silnika, z którego pobrano próbkę oleju smarowego 73
4.14. Czas pracy badanych olejów silnikowych wykorzystany w analizie w podziale na przeznaczenie silnika, z którego pobrano próbkę oleju smarowego 74
4.15. Liczba próbek badanych olejów silnikowych wykorzystana w analizie w podziale na przeznaczenie silnika, z którego pobrano próbkę oleju smarowego 74
4.16. Czas pracy badanych olejów silnikowych wykorzystany w analizie w podziale na producenta silnika, z którego pobrano próbkę oleju smarowego 75
4.17. Liczba próbek badanych olejów silnikowych wykorzystana w analizie w podziale na producenta silnika, z którego pobrano próbkę oleju smarowego 76
4.18. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Generał Bem 77
4.19. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Generał Jasiński 78

4.20. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Generał Jasiński 79
4.21. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Generał Jasiński 80
4.22. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Generał Madaliński 81
4.23. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika głównego statku m/s Goleniów 82
4.24. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Kopalnia Gottwald 83
4.25. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Kopalnia Machów 84
4.26. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Mirosławiec 85
4.27. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Pomorze Zachodnie 86
4.28. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Powstaniec Styczniowy 87
4.29. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Powstaniec Warszawski 88
4.30. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Studzianki 89
4.31. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Syn Pułku 90
4.32. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Syn Pułku 91
4.33. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Syn Pułku 92
4.34. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Syn Pułku (zmiana oleju smarowego) 94

4.35. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Uniwersytet Jagielloński ... 95
4.36. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Uniwersytet Jagielloński ... 96
4.37. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Uniwersytet Warszawski ... 97
4.38. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Uniwersytet Wrocławski ... 98
4.39. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Uniwersytet Wrocławski ... 99
4.40. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Uniwersytet Wrocławski ... 100
4.41. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika głównego statku m/s Wyszków ... 101
4.42. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika głównego statku m/s Zgorzelec ... 102
4.43. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju smarowego z instalacji smarowania obiegowego silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Ziemia Chełmińska ... 103
4.44. Histogram długości czasu do uzyskania progowego poziomu alarmowego τ_2 ... 104
4.45. Histogram wartości zaobserwowanych szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem v_{1000} ... 105
4.46. Wyznaczone wartości wskaźników v_{1000} oraz τ_2 dla analizowanych silników ... 106
4.47. Gęstość prawdopodobieństwa rozkładu wskaźnika τ_2 ... 107
4.48. Dystrybuanta rozkładu wskaźnika τ_2 ... 108
4.49. Gęstość prawdopodobieństwa rozkładu wskaźnika v_{1000} ... 108
4.50. Dystrybuanta rozkładu wskaźnika v_{1000} ... 109
4.51. Wartości wskaźnika τ_2 w podziale na model silnika ... 111
4.52. Wartości wskaźnika v_{1000} w podziale na model silnika ... 111
4.53. Wartości wskaźnika τ_2 w podziale na w podziale na oznaczenie handlowe środka smarowego ... 113
4.54. Wartości wskaźnika v_{1000} w podziale na oznaczenie handlowe środka smarowego ... 113

4.55. Wartości wskaźnika τ_2 w podziale na klasę lepkościową SAE oleju smarowego w instalacji smarowania silnika 115
4.56. Wartości wskaźnika ν_{1000} w podziale na klasę lepkościową SAE oleju smarowego w instalacji smarowania silnika 116
4.57. Wartości wskaźnika τ_2 w funkcji wskaźnika lepkości oleju smarowego w instalacji smarowania silnika 117
4.58. Wartości wskaźnika ν_{1000} w funkcji wskaźnika lepkości oleju smarowego w instalacji smarowania silnika 118

SPIS TABEL

2.1. Wartości współczynnika S_{gr} dla wybranych materiałów, z których wykonane są współpracujące ciernie elementy 25
2.2. Porównanie metod wykrywania zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem 29
2.3. Porównanie wybranych właściwości oleju silnikowego i wybranych paliw 34
3.1. Wartości ostrzegawcze temperatury zapłonu wybranych olejów smarowych 48
3.2. Wartości graniczne temperatury zapłonu obiegowych olejów smarowych rekomendowane przez producentów silników okrętowych 49
4.1. Podstawowe dane statków, których silniki były poddane analizie 63
4.2. Podstawowe dane badanych silników, których silniki były poddane analizie 64
4.3. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Generał Bem 77
4.4. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Generał Bem 77
4.5. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Generał Jasiński 78
4.6. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Generał Jasiński 78
4.7. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Generał Jasiński 79
4.8. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Generał Jasiński 79
4.9. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Generał Jasiński 80
4.10. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Generał Jasiński 80
4.11. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Generał Madaliński 81
4.12. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Generał Madaliński 81

4.13. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika głównego statku m/s Goleniów 82
4.14. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika głównego statku m/s Goleniów 82
4.15. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Kopalnia Gottwald 83
4.16. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Kopalnia Gottwald 83
4.17. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Kopalnia Machów 84
4.18. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Kopalnia Machów 84
4.19. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Mirosławiec 85
4.20. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Mirosławiec 85
4.21. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Pomorze Zachodnie 86
4.22. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Pomorze Zachodnie 86
4.23. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Powstaniec Styczniowy 87
4.24. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Powstaniec Styczniowy 87
4.25. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Powstaniec Warszawski 88
4.26. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Powstaniec Warszawski 88
4.27. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Studzianki 89
4.28. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Studzianki 89
4.29. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Syn Pułku 90
4.30. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Syn Pułku 90

4.31. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Syn Pułku 91
4.32. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Syn Pułku 91
4.33. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Syn Pułku 92
4.34. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Syn Pułku 93
4.35. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Syn Pułku (zmiana oleju smarowego) 93
4.36. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Syn Pułku (zmiana oleju smarowego) 94
4.37. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Uniwersytet Jagielloński 94
4.38. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Uniwersytet Jagielloński 95
4.39. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Uniwersytet Jagielloński 96
4.40. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Uniwersytet Jagielloński 96
4.41. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Uniwersytet Warszawski 97
4.42. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Uniwersytet Warszawski 97
4.43. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Uniwersytet Wrocławski 98
4.44. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Uniwersytet Wrocławski 98
4.45. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Uniwersytet Wrocławski 99
4.46. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 2 statku m/s Uniwersytet Wrocławski 99
4.47. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Uniwersytet Wrocławski 100

4.48. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 3 statku m/s Uniwersytet Wrocławski 100
4.49. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika głównego statku m/s Wyszków 101
4.50. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika głównego statku m/s Wyszków 101
4.51. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika głównego statku m/s Zgorzelec 102
4.52. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika głównego statku m/s Zgorzelec 102
4.53. Metryczka zestawu danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Ziemia Chełmińska 103
4.54. Parametry procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem dla danych pomiarowych silnika pomocniczego nr 1 statku m/s Ziemia Chełmińska 103

PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

1. Wolak, A.; Zając, G.; Żółty, M. Changes of properties of engine oils diluted with diesel oil under real operating conditions. *Combust. Engines* **2018**, *173*, 34–40, doi:10.19206/CE-2018-206.
2. Ito, T.; Kitamura, T.; Kojima, H.; Kawanabe, H. Prediction of Oil Dilution by Post-injection in DPF Regeneration Mode.; 2019.
3. Thornton, M.J.; Alleman, T.L.; Luecke, J.; McCormick, R.L. *Impacts of Biodiesel Fuel Blends Oil Dilution on Light-Duty Diesel Engine Operation*; AE International Powertrains, Fuels, and Lubricants Meeting: Florence, 2009;
4. Chybowski, L. *Rozcieńczenie oleju paliwem jako czynnik ryzyka eksplozji w skrzyniach korbowych okrętowych bezwodzikowych silników spalinowych*; Maritime University of Szczecin Press: Szczecin, 2023; ISBN 978-83-64434-56-3.
5. Chybowski, L. *Eksplozje w skrzyniach korbowych silników okrętowych – przyczyny, zapobieganie i minimalizacja skutków*; Akademia Morska w Szczecinie: Szczecin, 2022;
6. Merkisz, J. *Studium problemu zużycia oleju w czterosuwowych silnikach spalinowych*; Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej: Poznań, 1989;
7. Merkisz, J. *Zużycie oleju w szybkoobrotowych silnikach spalinowych*; Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej: Poznań, 1994;
8. DFC Diesel Failure analysis Available online: https://dfcdiesel.com/warranty-info/failure-analysis/ (accessed on Jun 16, 2026).
9. Mahle Aftermarket Inc. *Engine Components and Filters: Damage Profiles, Probable Causes and Prevention*; mahled-317.;
10. Castrol Oil contamination identification. A list of the Top Offenders.
11. Kaminski, P. Investigation Lubricity Performance of Lubricating Oil Used in Marine Diesel Engine—Fuel Injection Pump. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 6148, doi:10.3390/app14146148.
12. TotalEnergies Fuel dilution of engine oil: causes and effects Available online: https://lubricants.totalenergies.com/fuel-dilution-engine-oil-causes-and-effects (accessed on Jun 24, 2026).
13. Technomics International Case Study—Fuel Dilution of Engine Oil in Locomotives Available online: https://www.techenomics.net/fluid-management-services/case-studies/fuel-dilution-of-engine-oil-in-locomotives/ (accessed on Jun 24, 2026).

14. Critchley, L. Fuel Dilution in Engine Oil—How It Happens and What It Leads To Available online: http://azom.com/article.aspx?ArticleID=16891 (accessed on Jun 24, 2026).
15. Mahle Aftermarket Inc. *Engine Bearing: Failure Analysis and Correction*; CEB-2-1114.; Clevite: Farmington Hills;
16. Wilczkowski, A. *Awarie silników spalinowych. Uszkodzenia w układach korbowych*; Mossakowski i Wrochna Sp. j. w Łodzi: Łódź, 1996; ISBN 83-902511-8-3.
17. Wilczkowski, A. *Awarie silników spalinowych. Uszkodzenia części stałych i napędów rozrządu*; Mossakowski i Wrochna Sp. j. w Łodzi: Łódź, 1999; ISBN 83-902511-8-3.
18. Chybowski, L. Lube oil—diesel oil mixes-dataset Available online: https://data.mendeley.com/datasets/scbx3h2bmf/3 (accessed on Jun 27, 2026).
19. Dieselhub Fuel Dilution in Diesel Engines. Fuel Dilution Causes, How to Protect your Engine Available online: https://www.dieselhub.com/maintenance/fuel-dilution.html (accessed on Jun 24, 2026).
20. Taylor, R.I. Fuel-Lubricant Interactions: Critical Review of Recent Work. *Lubricants* **2021**, *9*, 92, doi:10.3390/lubricants9090092.
21. Bowen, P.J. Current Understanding of Oil-Mist Explosions. In *Crankcase explosions*; IMAREST: London, 2002; pp. 149–164.
22. Krupowies, J. *Badania pierwiastków śladowych w oleju obiegowym jako element diagnostyki silnika*; Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie: Szczecin, 2001;
23. Krupowies, J. *Badania i ocena zmian właściwości użytkowych olejów urządzeń okrętowych*; Maritime University of Szczecin: Szczecin, 2009;
24. Sejkorová, M.; Hurtová, I.; Jilek, P.; Novák, M.; Voltr, O. Study of the Effect of Physicochemical Degradation and Contamination of Motor Oils on Their Lubricity. *Coatings* **2021**, *11*, 60, doi:10.3390/coatings11010060.
25. Baczewski, K.; Kałdoński, T. *Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym*; WKiŁ: Warszawa, 2018;
26. Baczewski, K.; Szczawiński, P. Badanie właściwości reologicznych estrów metylowych oleju rzepakowego i ich mieszanin z olejami napędowymi. *J. KONES Powertrain Transp.* **2007**, *14*, 29–38.
27. Abdullah, M.; Abdollach, M.; Mat-Nuri, N.; Amiruddin, H.; Tamaldin, N. Comparison of the frictional properties of nano-oil and SAE 15W40 oil diluted with biodiesel fuel. In Proceedings of the Malaysian International Tribology Conference 2015; 2015; pp. 190–191.
28. Mori, K.; Sugimoto, N.; Yamane, K.; Kawasaki, K. Influence of Biodiesel Fuel on Lubricant Oil Oxidative Degradation. *SAE Tech. Pap. Ser.* **2015**, *JSAE 20159*, 1–7, doi:10.4271/2015-01-2030.
29. Urzędowska, W.; Stępień, Z. Olej silnikowy a biopaliwa – współdziałanie w eksploatacji. *Nafta-Gaz* **2010**, *październi*, 914–921.

30. Watson, S.A.G.; Wong, V.W. *The Effects of Fuel Dilution with Biodiesel on Lubricant Acidity, Oxidation and Corrosion—a Study with CJ-4 and CI-4 PLUS Lubricants*; 2008 Diesel Engine-Efficiency and Emissions Research (DEER) Conference August 7th, 2008; Cambridge, MA, USA, 2008;
31. Chybowski, L.; Kowalak, P.; Dąbrowski, P. Assessment of the Impact of Lubricating Oil Contamination by Biodiesel on Trunk Piston Engine Reliability. *Energies* **2023**, *16*, 5056, doi:10.3390/en16135056.
32. Rosłanowski, J.; Charchalis, A. Material Consumption Criteria of Piston - Con-Rod Elements System of Combustion Engine. *J. KONES Powertrain Transp.* **2013**, *20*, 397–402.
33. Włodarski, J.; Podsiadło, A.; Kluj, S. *Uszkodzenia systemu tłok-cylinder (TC) okrętowych silników spalinowych*; Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni: Gdynia, 2011;
34. Winterbone, D.E.; Turan, A. *Advanced Thermodynamics for Engineers*; Elsevier, 2015; ISBN 9780444633736.
35. Kozaczewski, W. *Konstrukcja grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinowych*; WKiŁ: Warszawa, 2004;
36. Chybowski, L.; Szczepanek, M.; Gawdzińska, K. Arrhenius Equation for Calculating Viscosity in Assessing the Dilution Level of Lubricating Oil with Diesel Oil—A Case Study of SAE 30 and SAE 40 Grade Marine Lubricating Oils. *Energies* **2024**, *17*, 444, doi:10.3390/en17020444.
37. Krupowies, J. *Badania zmian właściwości oleju obiegowego okrętowych silników pomocniczych*; Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie: Szczecin, 2002;
38. Montaud, A.; Fabriek, W.P.; Vrolijk, D.J.E.; Lim, K.C.; Dunn, A. Contamination of marine crankcase lubricants by raw fuel: consequences, and methods of detection. *J. Inst. Energy* **1998**, *71*, 2–11.
39. AMETEK Spectro Scientific Measuring Fuel Dilution in Lubricating Oil Available online: https://www.spectrosci.com/knowledge-center/test-parameters/measuring-fuel-dilution-in-lubricating-oil (accessed on Jun 24, 2026).
40. ASTM International *ASTM D322-97(2016)—Standard Test Method for Gasoline Diluent in Used Gasoline Engine Oils by Distillation*; ASTM: West Conshohocken, 2022;
41. ASTM International *ASTM D5800-21—Standard Test Method for Evaporation Loss of Lubricating Oils by the Noack Method*; ASTM: West Conshohocken, 2021;
42. Coordinating European Council *CEC L-40-A-93 Evaporation Loss of Lubricating Oils (NOACK Evaporative Tester)*; Coordinatind European Council for the Development of Performance Tests for Transportation Fuels, Lubricants and Other Fluids: London, UK, 2013;
43. Zhong, Y.; Bao, Q.; Yuan, L.; Liu, J.; Cai, Y.; Chen, X. Analysis of Microplastics in Aquatic Shellfish by Pyrolysis—Gas Chromatography/Mass

Spectrometry after Alkali Digestion and Solvent Extraction. *Polymers (Basel).* **2022**, *14*, 3888, doi:10.3390/polym14183888.
44. ASTM International *ASTM D3524-14(2020)—Standard Test Method for Diesel Fuel Diluent in Used Diesel Engine Oils by Gas Chromatography*; ASTM, 2020;
45. ASTM International *ASTM D3525-20—Standard Test Method for Gasoline Fuel Dilution in Used Gasoline Engine Oils by Wide-Bore Capillary Gas Chromatography*; ASTM: West Conshohocken, 2020;
46. ASTM International *ASTM D7593-14—Standard Test Method for Determination of Fuel Dilution for In-Service Engine Oils by Gas Chromatography*; ASTM: West Conshohocken, 2023;
47. Coordinating European Council *CEC L-94-10 Determination of Asphaltenes in Used Engine Oil*; CEC: London, UK, 2010;
48. Kretzschmar, N.; Seifert, M.; Busse, O.; Weigand, J.J. Prediction of Retention Indices and Response Factors of Oxygenates for GC-FID by Multilinear Regression. *Data* **2022**, *7*, 133, doi:10.3390/data7090133.
49. The Japan Petroleum Institute *JPI-5S-23-2017—Engine oils—Determination of diesel fuel diluent*; JPI: Tokyo, 2017;
50. The Japan Petroleum Institute *JPI-5S-24-2017—Determination of gasoline diluent*; JPI: Tokyo, 2017;
51. Shimadzu Gas Chromatografy. Testing the Dilution Rate of Diesel in Engine Oil in Accordance with ASTM D3524.
52. Shimadzu Gas Chromatography. Testing the Gasoline Dilution Rate of Gasoline in Engine Oil in Accordance with ASTM D3525 and Japan Petroleum Institute Standard JPI-5S-24.
53. Shimadzu Gas Chromatography. Testing the Dilution Rate of Gasoline in Engine Oil in Accordance with ASTM D7593.
54. Moresco Techno Co., L. [Przykład analizy] Potwierdzenie zanieczyszczenia paliwa (badanie rozcieńczenia lekkiego oleju silnikowego) (jap.).
55. Akram, N.; Usman, M.; Haider, S.; Akhtar, M.S.; Gul, K. Impact of Diisocyanates on Morphological and In Vitro Biological Efficacy of Eco-Friendly Castor-Oil-Based Water-Borne Polyurethane Dispersions. *Polymers (Basel).* **2022**, *14*, 3701, doi:10.3390/polym14173701.
56. Akochi-Koble, E.; Pelchat, M.; Pinchuk, D.; Pinchuk, J.; Ismail, A.; Voort, F.R. van de; Dong, J.; Dwight, S.; Davies, M. Validation of a FTIR Spectroscopy Method for Measuring and Monitoring Fuel Dilution in Lubricating Oils. *Engineering* **1998**, 1–9.
57. Gong, X.; Tian, H.; Sun, Y.; Li, J. Research on Fuel-Dilution Monitoring of Engine Lubricant by FT-IR Spectroscopy. In Proceedings of the Proceedings of the 2016 5th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2016); Atlantis Press: Paris, France, 2016.

58. ASTM International *ASTM E2412-10(2018) —Standard Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry*; ASTM: West Conshohocken, 2018;
59. ASTM International *ASTM D8004-15—Standard Test Method for Fuel Dilution of In-Service Lubricants Using Surface Acoustic Wave Sensing*; ASTM: West Conshohocken, 2023;
60. Macián, V.; Tormos, B.; García-Barberá, A.; Balaguer, A. Application assessment of UV–vis and NIR spectroscopy for the quantification of fuel dilution problems on used engine oils. *Fuel* **2023**, *333*, 126350, doi:10.1016/j.fuel.2022.126350.
61. Li, J.; Tian, H.; Yunling, S.; Huang, H.; He, W. Monitoring Fuel Dilution of Diesel Engine Lubricant Oil by Ultraviolet Fluorescence Spectroscopy. *J. Phys. Conf. Ser.* **2022**, *2206*, 012029, doi:10.1088/1742-6596/2206/1/012029.
62. Reischman, P.; Jalkian, R. Method for determining residual fuel and insolubles contamination in used marine engine lubricants using UV-visible spectroscopy and chemometrics 2002.
63. Fang, H.L.; Alleman, T.L.; McCormick, R.L. Quantification of Biodiesel Content in Fuels and Lubricants by FTIR and NMR Spectroscopy. *AE Tech. Pap. 2006-01-3301* **2006**, doi:10.4271/2006-01-3301.
64. Altman, L.J.; Reischman, P.T. Method for detecting fuel dilution of marine lubricating oils 1990.
65. Royal Belgian Institute of Marine Engineers Detecting asphaltenes in lube oil.
66. International Organization for Standardization *ISO 28523:2009—Ships and marine technology—Lubricating and hydraulic oil systems—Guidance for sampling to determine cleanliness and particle contamination*; ISO: Genewa, 2009;
67. Kluj, S. *Diagnostyka urządzeń okrętowych*; Studium Doskonalenia Kadr s.c. Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni: Gdynia, 2000;
68. Krupowies, J. *Badania zmian parametrów fizykochemicznych silnikowych olejów smarowych eksploatowanych na statkach polskiej żeglugi morskiej*; Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie: Szczecin, 1996;
69. Polski Komitet Normalizacyjny *PN-EN IEC 60079-10-1:2021-09—Explosive atmospheres—Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres*; PKN: Warszawa, 2021;
70. CNBOP-PIB *Metody badania temperatury zapłonu substancji ciekłych niebezpiecznych pożarowo – wytyczne*; CNBOP-PIB-BW03P:2016 Standard, 2016;
71. Świerżewski, M. *Uwaga wybuch*; Instytut Wydawniczy CRZZ: Warszawa, 1972;

72. Chybowski, L. The Initial Boiling Point of Lubricating Oil as an Indicator for the Assessment of the Possible Contamination of Lubricating Oil with Diesel Oil. *Energies* **2022**, *15*, 7927, doi:10.3390/en15217927.
73. Speight, J.G. Hydrocarbons from Petroleum. In *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes*; Elsevier, 2011; pp. 85–126.
74. International Organization for Standardization *ISO 8217:2024. Petroleum product—Fuels (class F)—Specifications of marine fuels*; 6th ed.; ISO: Geneva, 2024;
75. Babrauskas, V. *Ignition handbook*; Society of Fire Protection Engineers: Gaithersburg, 2003;
76. International Organization for Standardization *ISO 2719:2016—Determination of flash point—Pensky-Martens closed cup method*; 4th ed.; ISO: Geneva, 2016;
77. International Organization for Standardization *ISO 13736:2021 Determination of flash point—Abel closed-cup method*; 4th ed.; ISO: Geneva, 2021;
78. International Organization for Standardization *ISO 1516:2002 Determination of flash/no flash—Closed cup equilibrium method*; 3rd ed.; ISO: Geneva, 2002;
79. International Organization for Standardization *ISO 1523:2002 Determination of flash point—Closed cup equilibrium method*; 3rd ed.; ISO: Geneva, 2002;
80. TSE *TSE - TS 1080 Method of Test For Flash Point With Tagliabue Open Cup*; TSE: Ankara, 1993;
81. International Organization for Standardization *ISO 2592:2017 Petroleum and related products—Determination of flash and fire points—Cleveland open cup method*; 3rd ed.; ISO: Geneva, 2017;
82. International Organization for Standardization *ISO 3679:2015 Determination of flash no-flash and flash point—Rapid equilibrium closed cup method*; 5th ed.; ISO: Geneva, 2015;
83. Anton Paar All Fired up for 150 Years Available online: https://www.anton-paar.com/uk-en/about-us/news/news/detail/all-fired-up-for-150-years/? (accessed on Jul 4, 2026).
84. Anton Paar Basics of Pensky–Martens closed-cup flash point testing Available online: Basics of Pensky–Martens closed-cup flash point testing (accessed on Jul 4, 2026).
85. AmSpec Linear vs. Non-Linear…that is the question Available online: https://www.amspecgroup.com/resources/linear-vs-non-linearthat-is-the-question/ (accessed on May 29, 2026).
86. Oleje-Smary AGIP Cladium 120 SAE 30 CD.
87. Oleje-Smary AGIP Cladium 120 SAE 40 CD.

88. PKN Orlen S.A. *Olej Napędowy. Ecodiesel Ultra B,D,F, Olej napędowy arktyczny klasy 2, Efecta Diesel B,D,F, Verva ON B,D,F*; PKN Orlen S.A.: Płock, 2021;
89. PKN Orlen S.A. *ZN-ORLEN-5 – Przetwory naftowe. Olej napędowy EFECTA DIESEL*; PKN Orlen S.A.: Płock, 2019;
90. Chybowski, L. Study of the Relationship between the Level of Lubricating Oil Contamination with Distillation Fuel and the Risk of Explosion in the Crankcase of a Marine Trunk Type Engine. *Energies* **2023**, *16*, 683, doi:10.3390/en16020683.
91. Chybowski, L.; Szczepanek, M.; Sztangierski, R.; Brożek, P. Modeling of Selected Parameters of Used Lubricating Oil Diluted with Diesel Oil Using the Characteristics of Fresh Lubricating Oil. *Energies* **2024**, *17*, 2047, doi:10.3390/en17092047.
92. Williamson, M. Flash Point Testing: A Comprehensive Guide Available online: https://precisionlubrication.com/articles/flash-point-testing/ (accessed on May 29, 2026).
93. Gearhead Oil Analysis Engine Oil Analysis.
94. Zaharia, C.; Niculescu, R.; Clenci, A.; Iorga, V. Analyse of used oil in order to emit diagnosis interpretations of the diesel engine operation. *Rom. J. Automot. Eng.* **2019**, *25*, 5–11.
95. Oilmanager Oil viscosity and its importance.
96. CIMAC Working Group 'Marine Lubricants' *Guidelines for the lubrication of medium speed siesel engines*; 2nd versio.; The International Council on Combustion Engines, 2008;
97. Anish Important Lube Oil Properties to be Considered While Choosing Marine Lube Oil for Your Ship.
98. Lubricants', C.W.G. 8 'Marine *CIMAC Recommendation 31. The lubrication of two-stroke crosshead diesel engines*; CIMAC: Frankfurt, 2017;
99. Fluid Life Why Diesel Fuel Dilution is Bad for Your Engine Available online: https://www.fluidlife.com/resource-center/data-interpretation/documents/diesel-fuel-dilution-bad-for-engine/?srsltid=AfmBOorfPD3AOOoWYoDWM3V06Hy5frcJUN3GBanqXVAg2ds843GZd9bG (accessed on Jul 29, 2026).
100. Niculescu, R.; Iorga-Simăn, V.; Trică, A.; Clenci, A. Study on the engine oil's wear based on the flash point. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2016**, *147*, 012124, doi:10.1088/1757-899X/147/1/012124.
101. International Organization for Standardization *ISO 5807:1985 Information processing—Documentation symbols and conventions for data, program and system flowcharts, program network charts and system resources charts*; ISO, 1985;
102. S&P Sea-web Ships Available online: https://maritime.ihs.com/ (accessed on Jun 8, 2026).

103. ASTM International *ASTM D 2270-10(2016) —Standard Practice for Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40 °C and 100 °C*; ASTM: West Conshohocken, 2016;
104. Olezol Viscosity Index (VI) Calculator.
105. Anton Paar ASTM D 2270—Viscosity Index (VI) from 40 °C and 100 °C.
106. Charchalis, A. Diagnostic and Measurement System for Marine Engines. *WSEAS Trans. Syst. Control* **2020**, *15*, 349–355, doi:10.37394/23203.2020.15.36.
107. Chybowski, L. *Diagnozowanie silników okrętowych z zapłonem samoczynnym w oparciu o analizę procesów wtrysku i spalania paliwa*; Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie: Szczecin, 2019;
108. Society of Automotive Engineers *SAE J300-2021. Engine Oil Viscosity Classification*; SAE International: Warrendale, 2021;
109. ASTM International *ASTM D5293-20—Standard Test Method for Apparent Viscosity of Engine Oils and Base Stocks Between −10 °C and −35 °C Using Cold-Cranking Simulator*; ASTM: West Conshohocken, 2020;
110. ASTM International *ASTM D4684-20a—Standard Test Method for Determination of Yield Stress and Apparent Viscosity of Engine Oils at Low Temperature*; ASTM: West Conshohocken, 2020;
111. ASTM International *ASTM D445-21e1—Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)*; ASTM: West Conshohocken, 2022;
112. ASTM International *No TitleASTM D7042-21a—Standard Test Method for Dynamic Viscosity and Density of Liquids by Stabinger Viscometer (and the Calculation of Kinematic Viscosity)*; ASTM: West Conshohocken, 2021;
113. ASTM International *ASTM D4683-20—Standard Test Method for Measuring Viscosity of New and Used Engine Oils at High Shear Rate and High Temperature by Tapered Bearing Simulator Viscometer at 150 °C*; ASTM: West Conshohocken, 2020;
114. ASTM International *ASTM D4741-21—Standard Test Method for Measuring Viscosity at High Temperature and High Shear Rate by Tapered-Plug Viscometer*; ASTM: West Conshohocken, 2021;
115. ASTM International *ASTM D5481-21—Standard Test Method for Measuring Apparent Viscosity at High-Temperature and High-Shear Rate by Multicell Capillary Viscometer*; ASTM: West Conshohocken, 2021;
116. CEC *CEC L-36-90 High shear high temperature viscosity measurement*; Coordinating European Council for the Development of Performance Tests for Transportation Fuels, Lubricants and Other Fluids: Brussels, 2019;
117. ASTM International *ASTM D3244-21a—Standard Practice for Utilization of Test Data to Determine Conformance with Specifications*; ASTM: West Conshohocken, 2021.

STRESZCZENIE

Metoda MORSO oceny szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem w silnikach okrętowych

W pracy przedstawiono zagadnienie oceny szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem w silnikach spalinowych, ze szczególnym uwzględnieniem jednostek okrętowych. Zjawisko przedostawania się paliwa do oleju silnikowego stanowi istotny problem eksploatacyjny, prowadzący do zmian jego właściwości fizykochemicznych, w tym przede wszystkim obniżenia lepkości oraz temperatury zapłonu, co wpływa na pogorszenie warunków smarowania i zwiększenie intensywności zużycia elementów silnika.

W pierwszej części pracy omówiono temperaturę zapłonu jako jeden z kluczowych parametrów diagnostycznych oleju silnikowego. Przedstawiono jej znaczenie eksploatacyjne oraz metody wyznaczania, ze szczególnym uwzględnieniem metody Pensky'ego–Martensa. Zagadnienia te stanowią podstawę do wykorzystania temperatury zapłonu jako parametru diagnostycznego w ocenie stopnia rozcieńczenia oleju paliwem i analizy dynamiki procesu rozcieńczania.

Następnie zaprezentowano autorską metodę oceny szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem. Metoda opiera się na modelu analitycznym, którego założenia obejmują przyjęcie liniowego charakteru zmian wybranych parametrów eksploatacyjnych. W ramach opracowania zdefiniowano progowe wartości parametrów oleju, opracowano procedurę przetwarzania danych pomiarowych oraz przedstawiono ogólny algorytm umożliwiający praktyczną implementację metody. Dodatkowo zaproponowano różne warianty realizacji układu diagnostycznego, obejmujące klasyczny model regresyjny w architekturze klient–serwer, model adaptacyjny z przetwarzaniem strumieniowym oraz system wielosilnikowy z centralnym serwerem.

Istotną część pracy stanowi egzemplifikacja opracowanej metody na podstawie rzeczywistych danych eksploatacyjnych pochodzących z silników okrętowych. Przeprowadzono analizę zróżnicowanego zbioru danych obejmującego różne typy silników, rodzaje olejów smarowych oraz warunki eksploatacyjne. Na podstawie wyników dla szeregu jednostek pływających dokonano oceny działania metody oraz jej przydatności w warunkach rzeczywistej eksploatacji.

Uzyskane wyniki pozwoliły na potwierdzenie możliwości wykorzystania temperatury zapłonu jako parametru diagnostycznego w ocenie szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem oraz wskazanie potencjału opracowanej metody w zastosowaniach eksploatacyjnych i diagnostycznych.

ABSTRACT

The MORSO Method for Assessing the Rate of Lubricating Oil Dilution by Fuel in Marine Engines

This monograph addresses the issue of assessing the rate of fuel dilution in lubricating oil within internal combustion engines, with particular emphasis on marine engines. The phenomenon of fuel ingress into engine oil represents a significant operational problem, leading to changes in its physicochemical properties, primarily a reduction in viscosity and flash point, which in turn deteriorates lubrication conditions and increases wear of engine components.

The first part of the monograph discusses the flash point as one of the key diagnostic parameters of engine oil. Its operational significance and methods of determination are presented, with particular attention given to the Pensky-Martens method. These considerations form the basis for using flash point as a diagnostic parameter in assessing the degree of fuel dilution in lubricating oil.

Subsequently, a novel method for evaluating the rate of fuel dilution in lubricating oil is presented. The method is based on an analytical model assuming a linear character of changes in selected operational oil parameters. Within the developed approach, threshold values of oil parameters are defined, a procedure for processing measurement data is formulated, and a general algorithm enabling practical implementation of the method is provided. In addition, different implementation variants of the diagnostic system are proposed, including a classical regression model in a client–server architecture, an adaptive model with stream processing, and a multi-engine system with a central server.

A significant part of the monograph is devoted to the application of the proposed method using real operational data obtained from marine internal combustion engines. A diverse dataset was analysed, covering different engine types, lubricating oils, and operating conditions. Based on the results obtained for a number of vessels, the performance of the method and its applicability under real operating conditions were evaluated.

The results confirm the potential of using flash point as a diagnostic parameter for assessing the rate of fuel dilution in lubricating oil and demonstrate the applicability of the proposed method in operational and diagnostic practice.



Prof. dr hab. inż. **Leszek Chybowski** – profesor Politechniki Morskiej w Szczecinie, specjalizujący się w diagnostyce i niezawodności maszyn, eksploatacji okrętowych silników spalinowych oraz w badaniach paliw i środków smarowych. Autor i współautor ponad 300 publikacji naukowych, w tym 15 monografii, oraz kilkunastu rozwiązań wynalazczych. Niniejsza publikacja jest trzecią – obok *Eksplozje w skrzyniach korbowych silników okrętowych – przyczyny, zapobieganie i minimalizacja skutków* oraz *Rozcieńczenie oleju paliwem w skrzyniach korbowych okrętowych bezwodzikowych silników spalinowych* – książką autora poświęconą przyczynom, skutkom, zapobieganiu i metodom detekcji rozcieńczenia oleju smarowego paliwem w okrętowych silnikach spalinowych.

Opracowanie prezentuje autorską metodę oceny szybkości rozcieńczania oleju smarowego paliwem, nazwaną MORSO w oparciu o wyniki okresowych pomiarów temperatury zapłonu oleju. (…) monografia stanowi ważną publikację z zakresu diagnozowania silników okrętowych, szczególnie w aspekcie zachowania bezpieczeństwa eksploatacji siłowni. Opisana metoda może być włączona w kompleksowe systemy diagnozowania nie tylko pojedynczych silników, jak i siłowni, czy podobnych silników eksploatowanych we flotach. Opracowanie w pełni zasługuje na jej opublikowanie.

prof. dr hab. inż. **Adam Charchalis**
Uniwersytet Morski w Gdyni

Monografia stanowi dojrzałe, kompleksowe i oryginalne opracowanie problematyki oceny procesu rozcieńczania oleju smarowego paliwem w silnikach spalinowych, ze szczególnym uwzględnieniem jednostek napędowych eksploatowanych na obiektach pływających (…) Zaproponowana koncepcja stanowi udane połączenie zagadnień z zakresu tribologii, diagnostyki technicznej i eksploatacji silników spalinowych, prowadząc do opracowania narzędzia o znaczącym potencjale zarówno poznawczym, jak i aplikacyjnym. (…) Szczególną wartość poznawczą i praktyczną ma przeprowadzona egzemplifikacja metody MORSO z wykorzystaniem rzeczywistych danych eksploatacyjnych pozyskanych z silników okrętowych (…)

prof. dr hab. inż. **Jerzy Merkisz**, dr h.c. mult.
Politechnika Poznańska

9 788364 434723
ISBN 978-83-64434-72-3
9 788364 434730
eISBN 978-83-64434-73-0

ORCID: 0000-0003-0245-3946