

Effect of mineral engine oil properties on the operational efficiency of gas cogeneration systems

Wpływ właściwości mineralnego oleju silnikowego na efektywność operacyjną gazowych systemów kogeneracyjnych



DOI: 10.15199/62.2024.11.24

An anal. of operating data of combustion engines used as stationary power generators in the energy industry was carried out. Diagnostic procedures for the properties of mineral engine oil during operation were discussed. The anal. included the compon. and phys. chem. properties of engine oil, such as the presence of elements, kinetic viscosity, acid and base no., as well as aging processes (oxidn. and nitration). Correlation anal. was carried out for the analyzed parameters, using the Pearson coeff. and Spearman rank correlation. It indicated many relationships between elements and chem. indicators, which may be important in the study of contamination, oil degradn. and operating processes.

Keywords: engine oils, cogeneration, lubrication, physicochemical properties

Przedstawiono obserwacje wynikające z eksploatacji silników spalinowych stosowanych w przemyśle energetycznym jako stacjonarne agregaty prądotwórcze. Na podstawie zgromadzonych danych zaprezentowano przykłady diagnostyki właściwości oleju silnikowego. Przeprowadzono analizę oraz opisano wybrane właściwości analizowanego oleju mineralnego, a także dokonano oceny efektywności stosowania wybranych olejów w kontekście eksploatacji badanego silnika gazowego.

Słowa kluczowe: oleje silnikowe, kogeneracja, smarowanie, właściwości fizyczno-chemiczne

W silnikach spalinowych prawidłowe smarowanie jest niewątpliwym zadaniem, ściśle związanym z poprawną eksploatacją jednostki. Jakość zastosowanych środków smarnych bezpośrednio wpływa na niezawodność i trwałość pracy silnika. Nowoczesne jednostki napędowe wymagają precyzyjnie dobranych olejów smarnych, aby zapewnić efektywność i bezawaryjne działanie. Istotnym czynnikiem decydującym o wydajności i kosztach eksploatacji silnika jest odpowiedni dobór oleju silnikowego, który najczęściej opiera się na specyfikacjach producenta, określających rodzaj i klasę lepkości odpowiednią dla danego modelu

silnika¹⁾. Wskazane jest stosowanie olejów mających homologację zgodną z wymaganiami producenta, gdyż nawet oleje silnikowe o tej samej klasie lepkości, lecz pochodzące od różnych producentów mogą wykazywać istotne różnice w zakresie właściwości fizyczno-chemicznych, co przekłada się na ich wpływ na eksploatację silnika. Stosowanie oleju niespełniającego wymagań dla silnika może powodować zwiększenie kosztów konserwacji, skrócenie okresów międzyprzegładowych lub uszkodzenie jednostki napędowej²⁾.

Różnice między olejami stosowanymi w silnikach o identycznych parametrach mogą znacząco oddziaływać



Dr inż. Adam KALWAR (ORCID: 0000-0001-6940-8053) w roku 2008 ukończył studia na Wydziale Informatyki i Zarządzania Wyższej Szkoły Humanistyczno-Ekonomicznej w Łodzi. W 2024 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. Jest pracownikiem PGNiG Termika Energetyka Przemysłowa SA. Specjalność – silniki gazowe, energetyka.



Dr hab. inż. Krzysztof PYTEL, prof. AGH (ORCID: 0000-0002-1924-8351), w roku 1996 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. W 2013 r. uzyskał stopień doktora habilitowanego nauk technicznych na tym samym wydziale. Jest profesorem uczelni w Katedrze Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska AGH. Specjalność – maszyny i urządzenia energetyczne.

*** Adres do korespondencji:**

Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: (12) 617-32-40, e-mail: krzysztof.pytel@agh.edu.pl

na eksploatację silników. Zamiana oleju na produkt nawet w tej samej klasie lepkości, lecz pochodzący od innego producenta, lub nawet zmiana wariantu oleju tego samego producenta, może wpłynąć na wydajność i niezawodność silnika. Dlatego dobór odpowiedniego oleju silnikowego ma priorytetowe znaczenie przy zapewnieniu niezawodności, maksymalnej wydajności oraz minimalizacji kosztów utrzymania, zwłaszcza w trudnych warunkach pracy³⁾.

Analizowane w pracy silniki gazowe sprzężone z generatorami prądowórczymi znajdują coraz szersze zastosowanie jako urządzenia wytwórcze, zastępując kotły gazowe ze względu na możliwość wytworzenia z tej samej porcji paliwa zarówno energii cieplnej, jak i elektrycznej, dodatkowo z większą sprawnością. Silniki gazowe cechuje obsługa pozbawiona skomplikowanych procedur oraz duży stopień zabezpieczenia urządzenia przed przekroczeniem dopuszczalnych parametrów pracy. Jednakże w trakcie eksploatacji silników gazowych pojawiają się problemy, których źródłem mogą być zarówno zmiany składu paliwa, jak i kwestie związane ze smarowaniem części ruchomych. W związku z tym zarządzanie zmianami składu paliwa oraz zapewnienie właściwego smarowania części ruchomych stanowią istotne trudności w eksploatacji tych jednostek. Wymagają one precyzyjnej kontroli, ciągłego monitorowania oraz odpowiedniego dostosowywania parametrów pracy, aby zagwarantować wydajność, niezawodność oraz długą żywotność silników gazowych⁴⁾.

Olej silnikowy, którego podstawową funkcją jest zmniejszenie tarcia i ochrona części silnika przed przedwczesnym zużyciem, odgrywa ważną rolę w odprowadzaniu ciepła oraz zabezpieczeniu elementów silnika przed działaniem substancji korozyjnych powstających w procesie spalania. Układ chłodzenia silnika odpowiada za ok. 60% wymiany ciepła, głównie w obrębie górnych elementów, takich jak głowica, ściany cylindrów i zawory⁵⁾. Natomiast dolne części silnika, w tym wał korbowy i układ rozrządu, są chłodzone przez olej silnikowy. Dodatkowo olej silnikowy spełnia funkcje uszczelniające, czyszczące oraz wykazuje zdolność separacji wody. Jakość oleju silnikowego w głównej mierze zależy od zawartych w nim dodatków, które są mieszane z olejem bazowym. Dodatki te są chemicznie aktywne (dyspergatory, detergenty, środki zapobiegające zużyciu oraz inhibitory utleniania, rdzy i korozji) lub chemicznie obojętne (polepszacze wskaźnika

lepkości, inhibitory piany, depresatory)⁶⁾. Wraz z upływem czasu i wzrostem przebiegu silnika, olej traci swoje pierwotne właściwości z powodu takich czynników, jak zmiany temperatury pracy, starzenie, zanieczyszczenia, oraz działanie chemiczne. Właściwości oleju smarnego stopniowo się pogarszają. W trakcie procesu starzenia w oleju pojawiają się produkty aktywne powierzchniowo, które z jednej strony poprawiają jego właściwości smarne, ale z drugiej łatwo tworzą warstwy graniczne wewnątrz porowatych kanałów, zmniejszając znacząco ich średnicę i utrudniając wypływ oleju⁷⁾. Dodatkowo wraz z postępującym zużyciem silnika do oleju mogą przenikać spaliny, co negatywnie wpływa na jakość i efektywność smarowania. Czynniki wpływające na jakość oleju silnikowego to: (i) parametry konstrukcyjne silnika, w tym obciążenie, układ smarowania, filtracji i wentylacji skrzyni korbowej; (ii) stan techniczny silnika, obejmujący przebieg, zużycie części oraz osady na elementach silnika i w misce olejowej; (iii) zanieczyszczenia oleju związane ze starzeniem, produktami spalania paliwa, stabilnością dodatków, obecnością frakcji paliwowych i zanieczyszczeń mechanicznych; oraz (iv) warunki eksploatacji silnika, czyli sposób uzupełniania oleju i system konserwacji, a także liczba uruchomień silnika oraz warunki rozruchu, z uwzględnieniem wstępnego podgrzewania oleju w celu obniżenia jego lepkości, jak również smarowania wstępnego przed startem silnika, co znacząco wpływa na efektywność smarowania jego komponentów.

Olej silnikowy wymaga regularnego monitorowania i dostosowywania do warunków pracy, aby zapewnić optymalną wydajność oraz długowieczność silników, w tym również gazowych. Analizowane jednostki są wykorzystywane w systemach kogeneracji, które efektywnie przetwarzają energię zawartą w gazie na użyteczną moc elektryczną. Kogeneracja umożliwia jednoczesne wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła, co stanowi alternatywę dla lokalnego wykorzystania ciepła, a jednocześnie integracja odnawialnych źródeł energii z systemami kogeneracyjnymi ma potencjał w dynamice zrównoważonego rozwoju oraz zmniejszaniu emisji gazów cieplarnianych⁶⁾.

Celem badań była diagnostyka właściwości oleju silnikowego mineralnego oraz omówienie działań mających na celu przeciwdziałanie postępującym procesom starzenia środków smarowych stosowanych w gazowych agregatach kogeneracyjnych.



Dr inż. Roman FILIPEK (ORCID: 0000-0003-4763-023X) w roku 2006 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. W 2013 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych na tym samym wydziale. Jest adiunktem w Katedrze Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska AGH. Specjalność – mechanika komputerowa.



Dr inż. Franciszek KURDZIEL (ORCID: 0000-0572-1019-6083) ukończył studia na Wydziale Techniki i Informatyki Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. W 2024 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. Pracuje na stanowisku głównego specjalisty inżynierii produkcji w PGNiG Termika Energetyka Przemysłowa SA. Specjalność – budowa i eksploatacja maszyn.

Część doświadczalna

Obiekty i metody badań

Badania dotyczące zmian właściwości oleju silnikowego oraz jego wpływu na eksploatację silnika spalinowego przeprowadzono w warunkach rzeczywistych w funkcjonujących obiektach przemysłowych. Stanowisko badawcze stanowił silnik gazowy typoszeregu TCG 2032 V16 produkcji MWM Deutz, którego parametry są następujące: moc generatora 4,3/4,0 MWe, jednostkowe zużycie ciepła 8225,6 kJ/kWh, sprawność elektryczna 43,77%, strumień spalin 6,338 kg/s i temperatura wylotowa spalin 453°C.

Parametry oleju monitorowano poprzez pomiar temperatury i ciśnienia oleju przed i za filtrami. Celem badania było określenie wpływu zmian właściwości olejów smarowych podczas eksploatacji poprzez oszacowanie ich zdolności do utrzymania właściwości w okresie produkcji energii, a to oddziałuje na aspekty środowiskowe poprzez zmniejszenie częstotliwości koniecznej wymiany oleju, co z kolei minimalizuje ilość odpadów olejowych. Równocześnie zmiana właściwości olejów smarowych podczas eksploatacji silników gazowych wpływa na efektywność operacyjną poprzez wydłużenie okresów między wymianami, przez co zmniejsza koszty operacyjne i czas przestojów maszyn. Zewnętrzny układ olejowy, jak przedstawiono na schemacie uproszczonym instalacji oleju smarnego (rys. 1), obejmuje zbiornik oleju świeżego o pojemności 2000 dm³, który jest zasilany świeżym olejem i łączy się z miską olejową silnika gazowego za pomocą pompy olejowej (PO). Dodatkowo system zawiera zbiornik oleju zużytego o tej samej pojemności oraz licznik dolewek oleju (LO). Cała instalacja pomieści ok. 2200 dm³ oleju, a poziom oleju jest monitorowany za pomocą wskaźników oraz sygnalizacji niskiego poziomu, która aktywuje dopompowywanie oleju smarnego ze zbiornika świeżego oleju. Zewnętrzny układ olejowy jest zaprojektowany w celu zapewnienia zapasu świeżego oleju do bieżącego uzupełniania ubytków oleju w misce olejowej, które występują na skutek ubytków oleju. Uzupełnianie to jest zazwyczaj zautomatyzowane, chociaż istnieje również możliwość ręcznego zadziałania przez operatora silnika. Zewnętrzny układ olejowy umożliwia usunięcie oleju z silnika, który następnie jest przekazywany do zbiornika oleju



Fig. 1. Simplified diagram of the lubricating oil installation
Rys. 1. Schemat uproszczony instalacji oleju smarnego

zużytego. Skuteczne zarządzanie smarowaniem umożliwia utrzymanie zadanej wydajności układu kogeneracyjnego, znacząco wpływając na koszty operacyjne i efektywność produkcji. Prowadzone czynności obejmują utrzymywanie niezbędnego poziomu oleju, monitorowanie zużycia oleju oraz przeprowadzanie okresowych kontroli poziomu i analiz laboratoryjnych. Regularna wymiana filtrów głównych i drobnocząsteczkowych odbywa się na podstawie metryk operacyjnych^{7,8}.

Świeży olej jest dostarczany przez dostawcę w zamkniętych pojemnikach o pojemności 208 dm³ lub 1000 dm³, przy czym olej z pojemników 1000 dm³ jest całkowicie transferowany do zbiornika oleju świeżego, natomiast w przypadku pojemników 208 dm³ wpompowywana jest wymagana ilość oleju. Próbkę oleju są pobierane w interwałach co 1000 roboczogodzin silnika, z tolerancją do 100 roboczogodzin, oraz dodatkowo 150–300 roboczogodzin po wymianie oleju. Próbkę są pobierane z filtrów głównych za pomocą specjalnego króćca i przekazywane do laboratorium producenta oleju. Po wykonaniu analiz wyniki zostają opatrzone stosowną rekomendacją i trafiają do użytkownika w formie raportów (raport z aktualnego badania zestawiony z raportem z 4 poprzednich badań), które ułatwiają analizę przebiegu eksploatacji oleju smarnego. W analizach laboratoryjnych monitorowane są parametry smarne, zużycia, obecności zanieczyszczeń oraz dodatków. Na podstawie wyników ocenia się stan oleju, klasyfikując jego status do odpowiedniej z trzech kategorii: (i) olej nadaje się do dalszej eksploatacji, (ii) ostrzegawcza – wymagana jest wzmożona ostrożność, mogą być konieczne działania serwisowe i (iii) alert – wymagana jest natychmiastowa wymiana oleju.

Klasyfikacja ta umożliwia skuteczne zarządzanie jakością oleju oraz minimalizowanie ryzyka uszkodzenia silnika. Bieżące analizy oleju pozwalają na ocenę procesu starzenia środków smarowych oraz identyfikację potencjalnych uszkodzeń elementów silnika⁷. Zauważone pogorszenie parametrów oleju powoduje automatyczną zmianę jego statusu. W przypadku zmiany statusu na ostrzegawczy przeprowadzana jest natychmiastowa weryfikacja próbki, aby potwierdzić jej prawidłowe pobranie. Przy ponownym uzyskaniu statusu ostrzegawczego podejmowane są działania, takie jak: dolewka oleju z odpompowaniem odpowiedniej ilości przepracowanego oleju, zwiększenie częstotliwości analiz oraz diagnostyka silnika. W przypadku otrzymania statusu oznaczającego alert wymagana jest wymiana oleju.

Proces zużycia oleju silnikowego charakteryzuje się początkowym zwiększeniem stężenia zanieczyszczeń mechanicznych oraz stopnia kwasowości, przy równoczesnym spadku zasadowości, co jest typowe dla świeżego oleju w czasie eksploatacji⁹. Zmienność stężenia zanieczyszczeń mechanicznych można formalnie opisać równaniem różniczkowym, które uwzględnia dynamikę zmian właściwości oleju w funkcji czasu oraz jego interakcje z warunkami pracy silnika, uwzględnia procesy zachodzące

w oleju, takie jak jego starzenie, wprowadzenie nowych zanieczyszczeń oraz ich usuwanie. Ewolucję degradacji oleju smarnego można wyrazić jako proces stochastyczny $\{X(t), t \geq 0\}$ za pomocą procesu Wienera, który odnosi się do modelowania degradacji systemów technicznych, takich jak maszyny, silniki i materiały, a jego celem jest przewidywanie przyszłego stanu systemu oraz momentu, w którym może dojść do awarii lub konieczności przeprowadzenia konserwacji. Proces Wienera to rodzaj procesu stochastycznego, który opisuje losową zmienność w czasie i jest często stosowany do modelowania dynamicznych zjawisk fizycznych. W modelowaniu degradacji proces Wienera jest używany do opisu stopniowego zużycia systemu w sposób uwzględniający przypadkowość i niepewność. Jest to ciągły proces losowy z dryfem (systematycznym trendem wzrostu lub spadku) i losowymi fluktuacjami¹⁰⁾, który matematycznie można zapisać za pomocą równania⁹⁾ (1):

$$X(t) = X(0) + \mu \cdot t + \sigma \cdot B(t) \quad (1)$$

w którym $X(t)$ oznacza zmienną stanu – stan systemu w czasie t (poziom degradacji); $X(0)$ początkowy stan degradacji; μ dryf procesu – współczynnik reprezentujący średnią szybkość degradacji w czasie; t czas, s lub h zależnie od skali czasowej procesu; σ zmienność procesu – współczynnik wariancji określający stopień losowych wahań, a $B(t)$ standardowy ruch Browna reprezentujący przypadkowe zakłócenia w procesie.

Analizy teoretyczne^{9, 11)} oraz bieżące eksperymentalne analizy oleju¹²⁾ pozwalają określić przebieg procesu starzenia oleju oraz uzyskać informację, czy w silniku nie mają miejsca jakiegoś niepokojące zjawiska uszkodzenia elementów silnika. Pogorszenie parametrów oleju silnikowego zauważone w wynikach analiz jest automatycznie oznaczane zmianą statusu oleju. W trakcie badań przeprowadzono eksperymentalne testy na instalacjach kogeneracyjnych agregatów prądotwórczych napędzanych silnikami gazowymi, wykorzystującymi jako paliwo gaz z odmetanowania kopalń. Mając na uwadze zdarzenia ruchowe, eksploatacja oleju w analizowanej instalacji przebiegała w bardzo korzystnych warunkach. Silnik pracował przy stałych obrotach 1000 rpm, a zmiany obciążenia nie wiązały się ze zmianą prędkości obrotowej wału, badany układ zawierał rozbudowane algorytmy zabezpieczające silnik wraz z instalacją odzysku ciepła przed niewłaściwymi parametrami pracy, nadrzędny cel to zabezpieczenie poprawnych parametrów pracy silnika.

Wyniki badań

Regularna analiza oleju pozwala na wczesne wykrywanie problemów związanych z eksploatacją maszyn, takich jak zużycie części, spadek jakości oleju, zanieczyszczenia i nadmierna oksydacja, co minimalizuje ryzyko kosztownych awarii i przestojów. Ponieważ analiza składu i właściwości fizyczno-chemicznych oleju smarnego stała się

istotnym elementem utrzymania ruchu w przemysłowych systemach smarowania, pozwalając na długoterminową pracę maszyn i wydłużenie ich żywotności, dlatego badania podzielono logicznie na dwa etapy. W pierwszym etapie prowadzono badania, które miały na celu ocenę wpływu zmiennych warunków eksploatacyjnych na pracę silnika i efektywność oleju smarnego. Kolejne analizy miały na celu monitorowanie stanu technicznego maszyn i urządzeń, a także ocenę jakości i wydajności samego oleju i polegały na identyfikacji składu chemicznego i określeniu właściwości fizyczno-chemicznych oleju smarnego.

Analiza wpływu zdarzeń ruchowych oraz fluktuacji temperatury na eksploatację oleju smarnego w silnikach kogeneracyjnych

W trakcie eksploatacji oleju istotnym aspektem związanym z użytkowaniem silnika smarowanego tym olejem jest charakter pracy silnika oraz fluktuacje temperatury oleju^{9, 11)}, a najważniejszą rolę odgrywają zdarzenia ruchowe, takie jak liczba uruchomień i odstawienia silnika, zmiany obciążenia silnika i zakres zmian temperatury oleju.

Zmiany temperatury oleju podczas rozruchu silnika po krótkim oraz długim postoju przedstawiono na rys. 2 i 3. Linia zielona na wykresie reprezentuje prędkość obrotową zespołu, linia pomarańczowa temperaturę oleju smarnego, a linia różowa to chwilowa moc czynna generatora. Badana instalacja była instalacją kogeneracyjnych agregatów prądotwórczych napędzanych silnikami gazowymi wykorzystującymi jako paliwo gaz z odmetanowania kopalń. Przed uruchomieniem silnika zawsze była uruchamiana pomocnicza pompa olejowa zapewniająca wstępne smarowanie układów silnika, dodatkowo uruchamiane było dogrzewanie oleju, podnoszące temperaturę oleju do wartości 48°C, dopiero przy takiej temperaturze oleju silnik był uruchamiany. Podczas pracy silnika, niezależnie od temperatury otoczenia, temperatura oleju była utrzymywana na poziomie ok. 78°C. Silnik był zabezpieczony przed trwałym wzrostem temperatury, bowiem układ regulacji zmniejszał w takich przypadkach moc silnika. Podczas odstawienia i postoju silnika temperatura oleju nie spadała poniżej 20°C w sposób trwały.

Analiza składu i właściwości fizyczno-chemicznych oleju smarnego

Dane do analizy pracy silników gazowych zasilanych olejem mineralnym i syntetycznym były archiwizowane od momentu ich uruchomienia do osiągnięcia ok. 90 tys. roboczogodzin. Analiza składu oraz właściwości fizyczno-chemicznych oleju smarnego obejmowała: (i) skład chemiczny (badanie obecności pierwiastków, które mogą wskazywać na zużycie elementów metalowych lub na obecność zanieczyszczeń); (ii) właściwości fizyczne, obejmujące lepkość kinetyczną, liczbę kwasową (TAN) oraz liczbę zasadową (TBN), mające wpływ na efektywność działania oleju smarnego; (iii) procesy starzenia (oksydacja i nitracja)

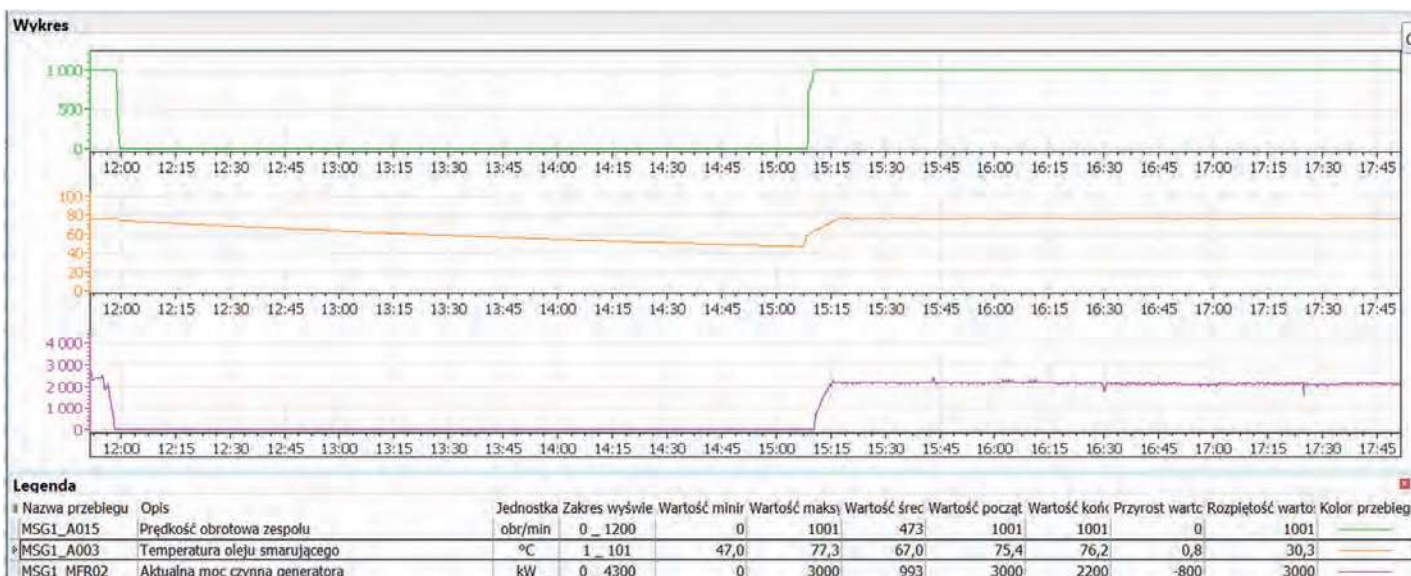


Fig. 2. Changes in oil temperature during engine start-up after a short standstill

Rys. 2. Wykres zmian temperatury oleju podczas rozruchu silnika po krótkim postoju

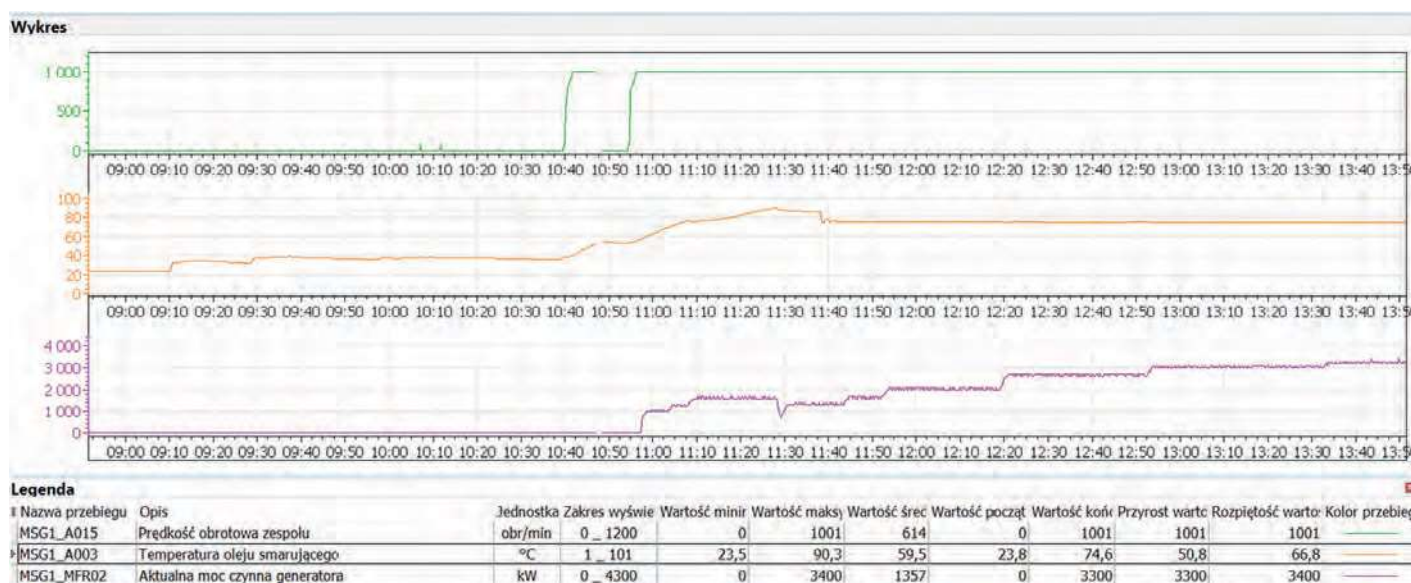


Fig. 3. Changes in oil temperature when starting the engine after a longer stop

Rys. 3. Wykres przedstawiający zmianę temperatury oleju podczas rozruchu silnika po dłuższym postoju

odnoszące się do zmian w oleju wynikających z jego długotrwałego użytkowania oraz procesów degradacji.

Badanie polegało na kompleksowej analizie chemicznej i fizycznej olejów smarnych w zakresie parametrów, takich jak: zawartość srebra, glinu, chromu, miedzi, żelaza, ołowiu, cyny, boru, wapnia, magnezu, fosforu, cynku, potasu, sodu, krzemu, PQ indeks (*particle quantifier*), lepkość kinematyczna, liczba kwasowa (TAN), liczba zasadowa (TBN), oksydacja oraz nitracja.

Na rys. 4 przedstawiono przykład zmiany zawartości sodu w oleju mineralnym na przestrzeni 48 094–75 805 roboczogodzin. Celem przeprowadzonego eksperymentu była weryfikacja, czy wzrost stężenia sodu w oleju jest wskaźnikiem przedostawania się płynu chłodniczego do układu olejowego, co najczęściej wynika z nieszczelno-

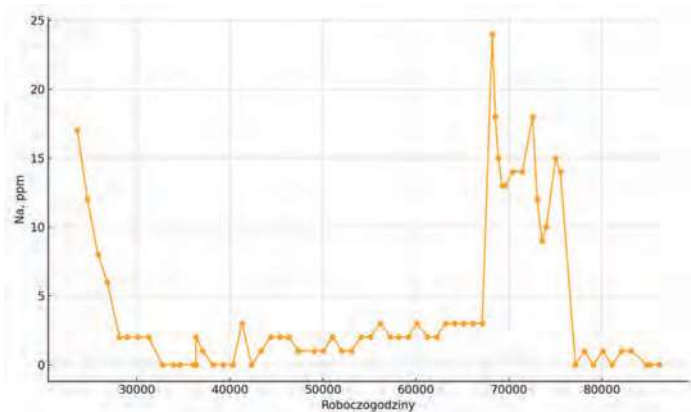


Fig. 4. Changes in sodium content in oil depending on engine operating hours

Rys. 4. Zmiany zawartości sodu w oleju w zależności od przepracowanych przez silnik roboczogodzin

ści układu chłodzenia, gdzie głównym źródłem wycieku bywa uszkodzona głowica. Dodatkowo sód mógł pochodzić z zanieczyszczeń lub dodatków zawartych w paliwie, które przedostawały się do oleju podczas pracy silnika. Na wykresie przedstawiono zmiany poziomu sodu w oleju smarnym w zależności od liczby przepracowanych przez silnik roboczogodzin, co dostarcza informacji pomocnych w monitorowaniu stanu technicznego silnika oraz ocenie efektywności działań naprawczych. Interpretacja tego wykresu pozwala na wyciągnięcie kilku istotnych wniosków dotyczących stanu silnika oraz jego układu smarowania i chłodzenia. W początkowym okresie pracy silnika (do ok. 32 000 roboczogodzin), poziom sodu zachowywał niskie wartości, co sugeruje stabilne warunki pracy silnika oraz brak poważniejszych problemów związanych z przedostawaniem się zanieczyszczeń do oleju. Na tym etapie silnik i układ chłodzenia działały prawidłowo, a stężenie Na utrzymywało się na niskim poziomie. W przedziale 32 000–65 000 roboczogodzin poziom Na w oleju smarnym pozostawał stabilny, na niskim poziomie (0–3 ppm), co potwierdza, że w tym okresie układ chłodzenia i smarowania funkcjonowały bez zarzutu. Nie zaobserwowano żadnych oznak przedostawania się płynu chłodniczego do oleju ani zanieczyszczeń pochodzących z innych źródeł. W zakresie 65 000–70 000 roboczogodzin następował gwałtowny wzrost poziomu Na w oleju, osiągając szczytowy poziom ok. 24 ppm. Taki nagły wzrost był silnym sygnałem wskazującym na problem techniczny, najprawdopodobniej uszkodzenie w układzie chłodzenia silnika. Mogło to być związane z nieszczelnością głowic lub uszkodzeniem tulei cylindrowej, co prowadziło do przedostawania się płynu chłodniczego do oleju smarnego. W okresie występowania podwyższonych zawartości sodu w oleju stosowano regenerowane głowice cylindrowe. Po wymianie uszkodzonych głowic oraz dolewce oleju poziom sodu w oleju zaczynał sukcesywnie spadać z 24 ppm do ok. 12 ppm, a następnie do 9 ppm. To świadczy o skuteczności przeprowadzonych napraw, które jednak nie do końca rozwiązały problem, ponieważ sód wciąż utrzymywał się na poziomie ostrzegawczym. Następnie, w miarę dalszej eksploatacji silnika, poziom sodu ponownie wzrastał do ok. 15 ppm, co może wskazywać na pojawiające się problemy związane z przedostawaniem się płynu chłodniczego lub zanieczyszczeń do oleju smarnego. Ten wzrost sugeruje, że pomimo przeprowadzonych napraw, nadal występowały pewne uszkodzenia lub zanieczyszczenia. Po dalszych działaniach naprawczych, po wymianie głowic i po pełnej wymianie oleju, poziom sodu spadał do wartości bliskiej 1 ppm. Tak duży spadek świadczy o skutecznej eliminacji źródła zanieczyszczenia i pełnej regeneracji układu smarowania. Wnioski płynące z analizy dynamicznych zmian poziomu Na w zależności od stanu oleju smarnego i od roboczogodzin silnika wskazują, że: (i) stabilny, niski poziom sodu oznacza brak problemów z układem chłodzenia i smarowania; (ii) nagły wzrost zawartości sodu wskazuje na poważne problemy

z układem chłodzenia, takie jak przedostawanie się płynu chłodniczego do oleju i (iii) skuteczna naprawa i wymiana oleju pozwalają na znaczne obniżenie poziomu sodu, ale konieczna jest dalsza obserwacja, aby zapobiec kolejnym uszkodzeniom.

Przeprowadzono analizę korelacji dla analizowanych parametrów⁷⁾. Zbadano zarówno liniową, jak i nieliniową zależność monotoniczną oraz siłę i charakter korelacji (pozytywna czy negatywna korelacja). W celu określenia liniowej korelacji monotonicznej pomiędzy parametrami zastosowano współczynnik korelacji Pearsona. Do oceny nieliniowej korelacji monotonicznej wykorzystano współczynnik korelacji rang Spearmana. Współczynniki te przyjmują wartości z przedziału $(-1, 1)$, gdzie wartość 1 wskazuje na pełną zgodność zmiennych w tym samym kierunku, a wartość -1 oznacza pełną zgodność w kierunku przeciwnym. Im bardziej współczynnik korelacji odbiega od 0, tym silniejsza jest zależność między badanymi zmiennymi¹⁰⁾. Współczynniki korelacji Pearsona oraz Spearmana dla wybranych parametrów oleju mineralnego przedstawiono w tabeli.

Analiza współczynnika korelacji Pearsona dla wybranych parametrów oleju mineralnego pokazała zależności pomiędzy różnymi pierwiastkami i wskaźnikami chemicznymi (tabela). **Srebro** wykazuje silną dodatnią korelację z chromem (0,70), co sugeruje, że w próbkach, gdzie poziom srebra jest wysoki, można również oczekiwać wysokiego stężenia chromu. Taka zależność może wskazywać na wspólne źródło pochodzenia tych metali lub ich współwystępowanie. Ponadto srebro wykazuje także umiarkowanie dodatnie korelacje z miedzią (0,39) i cyną (0,38), co może sugerować, że te trzy metale mogą być współobecne w produkcie. Należy jednak zwrócić uwagę, że srebro ma bardzo małe lub wręcz ujemne korelacje z innymi pierwiastkami, takimi jak glin (-0,18), co może sugerować, że występują one w zupełnie odmiennych warunkach lub procesach. **Glin** ma ogólnie słabe lub ujemne korelacje z większością pierwiastków, co może wskazywać na jego odmienną naturę chemiczną lub występowanie w innych materiałach niż analizowane. Na przykład ujemna korelacja z fosforem (-0,20) i ołowiem (-0,03) sugeruje, że w środowiskach bogatych w glin zawartość tych pierwiastków może być mała. Z drugiej strony, umiarkowana dodatnia korelacja z miedzią (0,40) wskazuje, że w niektórych przypadkach glin i miedź mogą współwystępować, co może być związane z ich występowaniem w niektórych stopach lub produktach przemysłowych. **Chrom**, podobnie jak srebro, wykazuje silną dodatnią korelację z borem (0,75), co sugeruje, że oba pierwiastki mogą być częścią podobnych procesów chemicznych. Ponadto chrom ma dodatnie korelacje z potasem (0,68) i wapniem (0,31), co może sugerować, że w środowiskach, gdzie te pierwiastki są obecne, chrom może odgrywać istotną rolę. Większe stężenie chromu jest również związane z obecnością miedzi (0,37), co może sugerować podobne zastosowania technologiczne

Table. Pearson (upper right part of the table) and Spearman (lower left part of the table) correlation coefficients for selected parameters for mineral oil
 Tabela. Współczynnik korelacji Pearsona (górną prawą część tabeli) i Spearmana (dolną lewą część tabeli) dla wybranych parametrów dla oleju mineralnego

	Ag	Al	Cr	Cu	Fe	Pb	Sn	PQ	B	Ca	Mg	P	Zn	K	Na	Si	N	TAN	TBN	Oks.	Nit.
Ag	1	0,18	0,70	0,39	0,04	0,23	0,38	-0,04	0,35	0,04	0,15	-0,04	-0,02	-0,04	0,05	0,08	0,08	-0,08	-0,07	0,14	0,06
Al	0,20	1	0,04	0,40	-0,28	-0,03	-0,08	-0,20	-0,05	0,32	-0,08	-0,20	-0,16	-0,14	-0,04	-0,01	0,23	-0,37	0,15	0,15	-0,14
Cr	0,70	0,05	1	0,37	0,16	0,08	0,24	-0,12	0,75	0,31	0,53	0,29	0,31	0,68	0,72	0,12	0,18	-0,15	-0,10	0,20	0,15
Cu	0,30	0,39	0,31	1	-0,25	0,34	0,31	-0,61	0,51	-0,05	0,22	-0,12	-0,07	0,18	0,33	0,03	0,52	-0,65	-0,17	0,54	0,13
Fe	0,10	-0,34	0,22	-0,23	1	0,39	0,03	0,48	0,10	0,72	0,68	0,69	0,68	0,17	0,18	0,04	0,44	0,78	-0,72	0,43	0,75
Pb	0,23	-0,01	0,08	0,31	0,37	1	0,38	-0,13	0,13	0,31	0,04	0,23	0,24	-0,08	0,02	0,08	0,39	0,12	-0,44	0,54	0,48
Sn	0,55	-0,04	0,36	0,34	0,09	0,41	1	-0,18	0,25	0,55	0,26	0,36	0,43	0,03	0,06	0,14	0,16	-0,17	-0,08	0,15	0,07
PQ	0,03	-0,12	-0,10	-0,71	0,35	-0,21	-0,18	1	-0,33	-0,43	-0,27	-0,25	-0,45	-0,17	-0,26	-0,17	-0,14	0,73	-0,19	-0,10	0,32
B	0,28	-0,02	0,41	0,48	0,06	0,17	0,34	-0,38	1	0,39	0,71	0,42	0,35	0,73	0,79	0,12	0,27	-0,28	-0,13	0,34	0,19
Ca	0,10	-0,32	0,34	-0,04	0,80	0,29	0,46	-0,42	0,32	1	0,69	0,91	0,95	0,40	0,44	0,31	0,10	-0,23	-0,11	0,00	0,30
Mg	0,17	-0,08	0,46	0,25	0,56	0,08	0,32	-0,27	0,61	0,69	1	0,71	0,72	0,59	0,61	0,24	0,04	-0,14	0,06	0,09	0,24
P	-0,02	-0,22	0,26	-0,10	0,71	0,28	0,31	-0,23	0,31	0,90	0,68	1	0,96	0,45	0,51	0,26	0,36	0,05	-0,33	0,32	0,40
Zn	0,00	-0,15	0,31	-0,07	0,66	0,29	0,35	-0,47	0,16	0,89	0,68	0,95	1	0,46	0,49	0,35	0,03	-0,40	0,07	-0,06	0,15
K	-0,07	-0,20	0,26	0,43	-0,03	0,14	0,40	-0,44	0,51	0,32	0,40	0,25	0,37	1	0,96	0,10	0,18	-0,17	-0,06	0,15	0,15
Na	0,22	0,21	0,36	0,81	0,11	0,41	0,33	-0,61	0,58	0,61	0,51	0,62	0,56	0,36	1	0,07	0,32	-0,23	-0,16	0,32	0,24
Si	0,16	0,04	0,23	0,22	0,01	0,20	0,29	-0,22	0,20	0,26	0,22	0,24	0,36	0,31	0,16	1	-0,02	-0,16	0,33	-0,07	-0,27
N	0,07	0,20	0,20	0,57	0,38	0,39	0,16	-0,27	0,26	0,32	0,16	0,45	0,21	0,17	0,64	0,12	1	0,04	-0,69	0,78	0,68
TAN	-0,04	-0,43	-0,15	-0,71	0,66	0,11	-0,14	0,65	-0,26	-0,14	-0,11	-0,02	-0,38	-0,36	-0,44	-0,21	-0,15	1	-0,53	0,00	0,51
TBN	-0,09	0,21	-0,13	-0,20	-0,68	-0,42	-0,06	-0,05	-0,13	-0,18	0,05	-0,26	0,05	0,05	-0,37	0,22	-0,66	-0,36	1	-0,66	-0,85
Oks.	0,15	0,07	0,21	0,52	0,41	0,56	0,12	-0,21	0,30	0,05	0,04	0,27	-0,05	0,05	0,66	0,05	0,81	-0,04	-0,68	1	0,77
Nit.	0,07	-0,13	0,19	0,21	0,73	0,53	0,09	0,07	0,16	0,34	0,15	0,37	0,13	0,06	0,45	-0,15	0,67	0,33	-0,84	0,78	1

lub wspólne źródła. **Miedź** jest interesującym przypadkiem, ponieważ wykazuje pozytywne korelacje z kilkoma metalami, ale także silną ujemną korelację z indeksem PQ (-0,61). Wysokie wartości indeksu PQ mogą wskazywać na degradację lub zużycie oleju, co sugeruje, że duże stężenia miedzi mogą być związane z procesami zużycia lub erozji. Z drugiej strony, miedź koreluje dodatnio z wapniem (0,72) i cynkiem (0,22), co może sugerować, że te pierwiastki często występują razem w podobnych warunkach. Słaba korelacja z ołowiem (0,34) może wskazywać, że te metale rzadko współwystępują w tych samych proporcjach. **Żelazo** ma różnorodne korelacje z materiałami. Na przykład silne dodatnie korelacje z wapniem (0,72) i fosforem (0,68) mogą sugerować, że żelazo jest często obecne w środowiskach bogatych w te pierwiastki. Może to być związane z procesami technologicznymi, w których te pierwiastki są obecne. Z kolei umiarkowane korelacje z magnezem (0,68) i cynkiem (0,68) mogą wskazywać na ich obecność w produktach zawierających żelazo. Z drugiej strony, ujemna korelacja z liczbą zasadową TBN (-0,72) sugeruje, że w środowiskach, gdzie żelazo jest obecne, zasadowość może być obniżona, co może być wynikiem procesów chemicznych, które wykorzystują te pierwiastki. **Wapń** wykazuje silne dodatnie korelacje z kilkoma pierwiastkami, w tym z fosforem (0,91), cynkiem (0,95), magnezem (0,69) oraz chromem (0,31). Wysokie korelacje wapnia z fosforem i cynkiem mogą wskazywać na jego znaczenie w środowiskach bogatych w minerały. Z kolei dodatnie korelacje z potasem (0,40) i borem (0,39) mogą wskazywać na współwystępowanie tych pierwiastków w procesach technologicznych lub chemicznych. **PQ indeks**, który może reprezentować stopień zużycia materiałów, wykazuje silne ujemne korelacje z miedzią (-0,61) i cynkiem (-0,45). Może to wskazywać na erozję tych metali podczas procesów eksploatacyjnych, co prowadzi do wyższych wartości tego wskaźnika. **Liczba kwasowa** (TAN) ma umiarkowane korelacje ujemne z metalami, takimi jak chrom (-0,15) i żelazo (-0,78), co sugeruje, że wraz ze wzrostem zawartości tych metali, wartość TAN może się zmniejszać, co może być wynikiem reakcji chemicznych w środowisku kwaśnym.

Analiza korelacji między różnymi pierwiastkami chemicznymi pokazuje, że niektóre z nich mają tendencję do współwystępowania w określonych warunkach lub procesach^{13, 14}). Na przykład silne dodatnie korelacje między chromem, srebrem, wapniem i borem mogą wskazywać na podobne procesy technologiczne, które wpływają na te pierwiastki. Z kolei ujemne korelacje, zwłaszcza dotyczące glinu i indeksu PQ, sugerują odmienne warunki chemiczne lub procesy degradacji, w których metale te mogą uczestniczyć.

Analiza wyników korelacji Spearmana pomiędzy różnymi metalami, parametrami chemicznymi oraz wskaźnikami jakości ujawnia wiele zależności, które mogą być istotne z punktu widzenia chemii analitycznej i technologii materiałowej.

Chrom i srebro (0,6977) cechuje silna dodatnia korelacja, która sugeruje, że wzrost stężenia chromu jest związany ze wzrostem stężenia srebra, co może wskazywać na wspólne źródło pochodzenia obu metali w analizowanych próbkach, a więc może być istotne przy badaniu zanieczyszczeń.

Żelazo i wapń (0,8044) cechuje bardzo silna korelacja, która wskazuje, że te dwa pierwiastki są ze sobą ściśle powiązane, co może być wynikiem ich wspólnego występowania w materiałach.

Fosfor i cynk (0,9472) cechuje wyjątkowo wysoka korelacja, która sugeruje, że zmiany w stężeniu jednego z tych pierwiastków mogą znacząco wpływać na drugi.

Magnez i wapń (0,6947) cechuje silna korelacja, która może wskazywać na ich związek w procesach technologicznych.

PQ indeks i miedź (-0,7105) cechuje silna ujemna korelacja, która świadczy o tym, że wzrost poziomu miedzi prowadzi do spadku wartości tego indeksu, co może sugerować, że wysoka zawartość miedzi jest związana z degradacją jakości próbki, co jest istotne w kontekście monitorowania tego zanieczyszczenia.

Liczba zasadowa (TBN) i nitracja (-0,8418) to silna ujemna korelacja, która sugeruje, że wzrost poziomu nitracji prowadzi do spadku liczby zasadowej, co jest istotne dla zrozumienia procesów chemicznych zachodzących w próbce. Dodatkowo wzrost stężenia azotanów może prowadzić do zakwaszenia środowiska, co jest istotne w kontekście ekologii i ochrony środowiska.

Liczba kwasowa (TAN) i liczba zasadowa TBN (-0,6647) to korelacja, która wskazuje, że im wyższa liczba kwasowa, tym niższa liczba zasadowa, co może być efektem procesów starzenia się olejów i ich degradacji, co jest istotne dla przemysłu petrochemicznego oraz diagnostyki olejów w układach silnikowych.

Korelacja między oksydacją i nitracją (0,7842) sugeruje, że procesy utleniania mogą przyczyniać się do wzrostu stężenia azotanów.

Między fosforem i wapniem występuje bardzo silna korelacja (0,8951), która sugeruje, że oba te pierwiastki są ze sobą ściśle związane i wzrost zawartości jednego z tych składników może wpływać na wzrost drugiego.

Między glinem i wapniem występuje średnia negatywna korelacja (-0,3204), która sugeruje, że zwiększenie stężenia wapnia może prowadzić do zmniejszenia stężenia glinu, co może być istotne w kontekście badań nad zanieczyszczeniami metalicznymi.

Analiza korelacji Spearmana ujawnia złożone i często niespodziewane powiązania pomiędzy różnymi pierwiastkami i parametrami chemicznymi. Wiele z tych zależności wskazuje na wspólne procesy chemiczne i technologiczne, które mogą być istotne zarówno w kontekście badań naukowych, jak i eksploatacji olejów^{15, 16}). Wskazania te mogą być podstawą do dalszych badań nad mechanizmami ich interakcji w różnych układach technologicznych^{17, 18}).

Wspólne wnioski z analizy współczynnika korelacji Pearsona i Spearmana dla wybranych pierwiastków i wskaźników chemicznych w oleju mineralnym: (i) współwystępowanie pierwiastków; srebro wykazuje silną dodatnią korelację z chromem (0,70 w analizie Pearsona oraz 0,6977 w analizie Spearmana), co sugeruje wspólne źródło lub podobne warunki ich występowania, występuje również umiarkowana korelacja srebra z miedzią i cyną; fosfor i cynk mają bardzo silną dodatnią korelację (0,9472 w analizie Spearmana), co wskazuje na ich wzajemne powiązanie i wspólne procesy w próbkach oleju; chrom wykazuje silne dodatnie korelacje z borem, potasem i wapniem, co sugeruje ich współwystępowanie w podobnych warunkach środowiskowych lub procesach technologicznych; (ii) związki między metalami a wskaźnikami chemicznymi: indeks PQ, który wskazuje na stopień zużycia, ma silną ujemną korelację z miedzią (-0,61 w analizie Pearsona i -0,7105 w analizie Spearmana), co może oznaczać, że większe stężenie miedzi jest związane z degradacją próbki oleju; liczba zasadowa (TBN) wykazuje silną ujemną korelację z nitracją (-0,8418 w analizie Spearmana), co sugeruje, że wzrost poziomu nitracji prowadzi do zakwaszenia środowiska i obniżenia zasadowości oleju; (iii) procesy degradacji i ich wpływ na parametry chemiczne: liczba kwasowa (TAN) ma ujemne korelacje z metalami, takimi jak chrom (-0,15) i żelazo (-0,78), co wskazuje na wpływ metali na obniżenie kwasowości oleju; oksydacja i nitracja wykazują wysoką korelację (0,7842 w analizie Spearmana), co sugeruje, że procesy utleniania przyczyniają się do wzrostu stężenia azotanów, co może być ważne w ocenie degradacji oleju; (iv) metale o specyficznych zachowaniach: glin ma słabe lub ujemne korelacje z większością pierwiastków, co sugeruje jego odmienną naturę chemiczną lub obecność w innych materiałach niż analizowane; żelazo ma silne dodatnie korelacje z wapniem i fosforem, co sugeruje, że współwystępują w środowiskach bogatych w te minerały.

Analiza korelacji wskazuje na wiele zależności między pierwiastkami i wskaźnikami chemicznymi, przez co może być istotna w badaniach zanieczyszczeń, degradacji olejów oraz procesów eksploatacyjnych.

Podsumowanie i wnioski

Wykorzystanie energii gazu kopalnianego do napędzania silnika spalinowego przyczynia się do poprawy bilansu ekologicznego, ekonomicznego i energetycznego silnika spalinowego użytkowanego w charakterze jednostki napędowej agregatu kogeneracyjnego. Skuteczność układu kogeneracji zależy od wielu czynników, w tym od rodzaju używanego paliwa, wydajności systemu kogeneracyjnego, technologii silnika spalinowego, właściwego zarządzania systemem,

rodzaju stosowanego oleju i odpowiedniego dostosowania układu do konkretnej sytuacji^{19, 20}).

Regularna analiza oleju smarnego pozwala na wczesne wykrywanie potencjalnych problemów związanych z eksploatacją maszyn, takich jak zużycie części i zanieczyszczenia. Monitorowanie składu chemicznego oraz właściwości fizyczno-chemicznych oleju zapewnia długotrwałą i efektywną pracę urządzeń^{9, 11}).

Korelacje między pierwiastkami dostarczają istotnych informacji o stanie technicznym maszyn oraz jakości oleju. Zmiany ilościowe i jakościowe w oleju smarnym mogą sygnalizować zużycie, uszkodzenia mechaniczne lub problemy związane z zanieczyszczeniem silnika i jego elementów, co wyraźnie odzwierciedlają wyniki przeprowadzonych analiz. Starannie prowadzona diagnostyka oleju, wspierana działaniami prewencyjno-naprawczymi, umożliwia wykrycie procesów zużyciowych już w ich początkowej fazie, co pozwala na szybsze podjęcie odpowiednich działań naprawczych, oszczędności oraz pozytywnie wpływa na efektywność operacyjną gazowych systemów kogeneracyjnych.

Otrzymano: 27-09-2024

Zrecenzowano: 01-10-2024

Zaakceptowano: 27-10-2024

Opublikowano: 20-11-2024

LITERATURA

- [1] K. Cupał, A. Dużyński, J. Grzelka, W. Bawor, *Energetyka gazowa*, ITC, Gliwice 2009.
- [2] N. Souza, A. Miguel Lenz, I. Werncke, C. Nogueira, J. Antonelli, J. Souza, *Engenharia Agrícola* 2016, **36**, 613.
- [3] A. Fiołek, S. Zimowski, T. Moskalewicz, *Archiv. Civ. Mech. Eng.* 2024, **48**, doi: 10.1007/s43452-024-00860-6.
- [4] M. Pałuchowska, B. Danek, *Przem. Chem.* 2014, **93**, nr 6, 828.
- [5] J. Veerapen, M. Beerepoot, *Co-generation and renewables. Solution for low-carbon energy future*, IEA, 2011.
- [6] T. Kałdoński, A. Król, *Biuletyn WAT* 2010 **59**, nr 1, 265, <https://bibliotekanauki.pl/articles/210277.pdf>.
- [7] A. Kalwar, F. Kurdziel, K. Pytel, *Przem. Chem.* 2021, **100**, nr 9, 846.
- [8] S. Gumuła, K. Pytel, M. Piaskowska-Silarska, *Pol. J. Environ. Stud.* 2014, **23**, nr 6, 2318.
- [9] M. Tanwar, N. Raghavan, [w:] *Proc. IEEE 3rd Int. Conf. Sens., Diagnostics, Prognostics, Control (SDPC)*, IEEE, China, Beijing 2019.
- [10] K. Targiel, *Studia Ekon.* 2014, **178**, 220.
- [11] Z. Zhang, X. Si, C. Hu, Y. Lei, *Eur. J. Operat. Res.* 2018, **271**, 775.
- [12] J.M. Wakiru, L. Pintelon, P.N. Muchiri, P.K. Chemweno, *Mech. Syst. Signal Process.* 2019, **118**, 108.
- [13] S. Gumuła, W. Hudy, M. Piaskowska-Silarska, K. Pytel, *Przem. Chem.* 2015, **94**, nr 9, 1516.
- [14] J. Ciuła, I. Wiewiórska, M. Banaś, T. Pająk, P. Szewczyk, *Energies* 2023, **16**, 3910.
- [15] L.M. Bednarz, *Przem. Chem.* 2014, **93**, nr 6, 817.
- [16] J. Mukawa, T. Pająk, T. Rzepecki, M. Banaś, *Energies* 2022, **15**, 5255.
- [17] E. De Filippo, A. Pagano, P. Russotto i in., *Phys. Rev. C* 2012, **86**, 014610.
- [18] E.V. Takeshita, R.V.P. Rezende, S.M.A. Gueli U. de Souza, A.A. Ulson de Souza, *Fuel* 2008, **87**, nr 10-11, 2168.
- [19] A. Żarczyński, M. Wilk, M. Grabarczyk-Gortat, *Przem. Chem.* 2015, **94**, nr 1, 43.
- [20] B. Haduch, R. Tadeusiewicz, *Przem. Chem.* 2018, **97**, nr 11, 1843.