

# Dywersyfikacja zespołów napędowych i paliw – wyzwania dla silnikowych olejów smarowych

## Powertrain and fuel diversification – challenges for engine oils

Zbigniew Stępień

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** W artykule opisano powody koniecznej dywersyfikacji zespołów napędowych i stosowanych do nich nośników energii wynikające z transformacji energetycznej transportu. Prowadzone na bieżąco badania i analizy dowodzą, że zasadne jest, aby w okresie przejściowym, do czasu całkowitej elektryfikacji transportu, tłokowe silniki spalinowe nadal stanowiły główną siłą napędową w transporcie, szczególnie komercyjnym. Wiąże się to z promowaniem dekarbonizacji paliw, aby przeciwdziałać zmianom klimatu. W związku z tym paliwa o zerowej/zmniejszonej emisji ditlenku węgla, takie jak metan, wodór, etanol, metanol, a nawet amoniak, odgrywają coraz większą rolę. Powyżej wskazane kierunki zmian w zakresie zespołów napędowych i paliw mają bezpośredni wpływ na modyfikację formułacji środków smarowych stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym. W konsekwencji przemysł środków smarowych musi dywersyfikować się w kierunku środków smarowych dostosowanych do wymagań różnorodnych zespołów napędowych, mając na uwadze konieczność zwiększania ich sprawności, osiągnięć i trwałości przy równoczesnym zmniejszeniu szkodliwych emisji i optymalizacji kosztów produkcji. Wymaga to pokonania wielu barier związanych ze sprzecznymi oczekiwaniami stawianymi olejom smarowym np. przez silniki spalinowe, takimi jak m.in.: udział w tworzeniu emisji pierwotnej, bezpieczeństwo i niezawodność funkcjonowania układów oczyszczania spalin, a także współdziałanie z paliwami o różnym składzie. W artykule opisano wymagania stawiane przede wszystkim smarowym olejom silnikowym w zależności od typu zespołu napędowego i stosowanego do niego paliwa. Zwrócono szczególną uwagę na charakterystyczne dla określonego paliwa wyzwania, jakim musi sprostać w silniku współpracujący z nim smarowy olej silnikowy. W przypadku tłokowych silników spalinowych podkreślono konieczność rozwiązania problemu coraz większego udziału spalane oleju smarowego w całkowitej emisji cząstek stałych. Wskazano też w tym aspekcie na zalety i perspektywy stosowania paliw syntetycznych. Omówiono do tej pory bardzo mało znane problemy, jakim musi przeciwdziałać silnikowy olej smarowy w przypadku napędów hybrydowych. Wskazano na konsekwencje i szczególne wymagania stawiane smarowym olejom silnikowym w przypadku stosowania obecnie mało spopularyzowanych, ale zdecydowanie perspektywicznych paliw, jak wodór i amoniak. W ostatniej części artykułu opisano w dużej części odmienne wymagania, jakie stawia się olejom smarowym do elektrycznych zespołów napędowych. W tym przypadku olej smarowy stosowany w skrzyniach biegów coraz częściej pełni równocześnie funkcję płynu do chłodzenia silników elektrycznych z chłodzeniem bezpośrednim. Bezpośredni kontakt oleju smarowego z elementami zespołów elektrycznych sprawia, że bardzo ważne są jego właściwości elektroizolacyjne. Generalnie olej smarowy powinien poprawić sprawność mechaniczną i zmniejszyć straty hydrauliczne przekładni w celu zmniejszenia zużycia energii elektrycznej i emisji CO<sub>2</sub> pojazdu elektrycznego powstającej podczas produkcji energii elektrycznej. Dodatkowa trudność przy opracowywaniu środków smarowych do napędów elektrycznych polega na tym, że do tej pory nie ma sprecyzowanych wymagań technicznych dla płynów eksploatacyjnych przeznaczonych do pojazdów elektrycznych. Brak jest też wielu znormalizowanych metod badawczych i określenia zakresu niezbędnych badań przedmiotowych płynów.

**Słowa kluczowe:** dywersyfikacja paliw, samochodowe zespoły napędowe, silnikowe oleje smarowe, problemy smarowania, przyszłe wymagania dla paliw i olejów smarowych.

**ABSTRACT:** The article explores the rationale behind the necessary diversification of powertrains and the energy carriers used in the energy transformation of transport. Ongoing research and analyses indicate that it is practical for piston internal combustion engines to remain the primary propulsion system used in transport, commercial transport in particular, during the transitional phase leading to complete electrification of transport. The promotion of fuel decarbonization is a critical step in combating climate change. As a result, zero or low carbon fuels such as methane, hydrogen, ethanol, methanol and even ammonia are becoming increasingly significant. These developments in powertrains and fuels directly influence the necessary changes in lubricants used in the automotive industry. Therefore, the lubricant industry must diversify into lubricants designed to meet the requirements of a wide variety of powertrains. This diversification should aim to enhance efficiency, performance and durability, simultaneously reducing harmful emissions and optimizing

Autor do korespondencji: Z. Stępień, e-mail: [zbigniew.stepien@inig.pl](mailto:zbigniew.stepien@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji: 08.11.2023 r. Zatwierdzono do druku: 13.12.2023 r.

production costs. This requires overcoming a number of barriers related to the conflicting requirements placed on lubricating oils by, e.g., internal combustion engines. These requirements include contributing to the reduction of primary emissions, safe and reliable operation of exhaust aftertreatment systems, and the interaction with fuels of different compositions. The article specifically details the requirements for engine oils, depending on the powertrains and fuels used. Particular attention was paid to the associated with the compatibility of engine oils with specific fuels. In the case of reciprocating internal combustion engines, the need to address the increasing contribution of burnt engine oils to total particulate emissions was highlighted. The advantages and future prospects for the use of synthetic fuels are discussed in this context. Additionally, the article delves into the lesser-known problems that engine oils must counteract in hybrid drive systems. The implications and specific requirements for engine oils when using currently underutilized but definitely promising fuels such as hydrogen and ammonia are discussed as well. The final section of the article extensively describes the various requirements placed on lubricating oils for electric powertrains. In electric power units, the lubricating oil used in transmissions increasingly commonly serve also the purpose of a cooling fluid for direct-cooling electric motors. The direct contact of lubricating oil with the components of electrical assemblies elevates the importance of its electrical insulating properties. In general, lubricating oils should improve mechanical efficiency and reduce hydraulic losses of a transmission in order to reduce electricity consumption and CO<sub>2</sub> emissions of an electric vehicle generated during the generation of electricity. An added challenge in the development of lubricants for electric drive systems is the absence of specified technical requirements for fluids in electric vehicles to date. Additionally, there is a lack of standardization of test methods and definition of the scope of the necessary tests for these fluids.

Key words: fuel diversification, automotive powertrains, engine lubricating oils, lubrication problems, future requirements for fuels and lubricating oils.

### Wstęp

Rosnące zapotrzebowanie na zwiększoną produkcję energii i problemy związane z ocieplaniem klimatu oraz zanieczyszczeniem środowiska naturalnego doprowadziły już do zmiany kierunku rozwoju napędów pojazdów samochodowych. Zdecydowano przy tym, szczególnie w Europie, o stosowaniu elektrycznych zespołów napędowych jako rozwiązania przyszłości. Jednak dotychczasowy przebieg elektryfikacji transportu dowodzi, że nie przebiega ona tak szybko, jak początkowo zakładano. Ponadto użytkownicy pojazdów elektrycznych wskazują na wiele niedogodności i problemów związanych z ich eksploatacją, co zniechęca do zakupu przyszłych potencjalnych nabywców. W rezultacie dostrzeżono, że poleganie na rozwoju tylko jednej technologii zespołu napędowego może prowadzić do niebezpiecznych, trudnych do zaakceptowania, nieodwracalnych konsekwencji. Doprowadziło to do wprowadzenia w pakiecie regulacji klimatycznych UE w ramach Europejskiego Zielonego Ładu (Fit for 55) poprawki dopuszczającej stosowanie paliw syntetycznych w celu zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub> przez już eksploatowane i przyszłe silniki spalinowe. Wskazuje to na konieczność dywersyfikacji zespołów napędowych i stosowanych do nich nośników energii w transformacji energetycznej transportu. Obecnie coraz częściej uważa się za zasadne, aby w okresie przejściowym, do czasu całkowitej elektryfikacji transportu, tłokowe silniki spalinowe nadal były głównym źródłem napędu środków transportu, szczególnie w transporcie komercyjnym. Dlatego, biorąc pod uwagę, że tworzenie ditlenku węgla i cząstek stałych jest spowodowane atomami węgla zawartymi w paliwach, promowana jest dekarbonizacja paliw, aby przeciwdziałać zmianom klimatu. W związku z tym paliwa o zerowej/zmniejszonej emisji ditlenku węgla, takie jak metan, wodór, etanol, metanol, a nawet

amoniak, odgrywają coraz większą rolę. W ostatnich latach zwłaszcza wodór budzi wielkie zainteresowanie badaczy, jak i konstruktorów, ponieważ jest paliwem o zerowej emisji ditlenku węgla i można go zastosować do zasilania tłokowych silników spalinowych. Zatem dojrzała, sprawdzona technologia może w dalszym ciągu służyć – w połączeniu z wodorem, postrzeganym jako najbardziej perspektywiczny i obiecujący nośnik energii w przyszłości. Wodór jest szczególnie obiecującym paliwem do silników o zapłonie iskrowym (ZI) ze względu na swoje właściwości, takie jak duża wartość liczby oktanowej badawczej (LOB), duża prędkość rozchodzenia się płomienia, duża wartość opałowa i mała energia zapłonu. Ponadto pozwala na pracę w warunkach zasilania ubogą mieszkanką gwarantującą stabilne spalanie (Hosseini i Butler 2020; Korn et al., 2021; Sens et al., 2021; Stępień, 2021; Stępień i Urzędowska, 2021). W konsekwencji przemysł środków smarowych musi dywersyfikować się w kierunku środków smarowych dostosowanych do wymagań różnorodnych zespołów napędowych, mając na uwadze konieczność zwiększania ich sprawności, osiągow i trwałości przy równoczesnym zmniejszaniu emisji szkodliwych składników spalin i optymalizacji kosztów produkcji. Wymaga to pokonania wielu barier związanych ze sprzecznymi wymaganiami stawianymi olejom smarowym np. przez silniki spalinowe, takimi jak m.in.: udział w tworzeniu emisji pierwotnej, bezpieczeństwo i niezawodność funkcjonowania układów oczyszczania spalin, a także współdziałanie z paliwami o różnym składzie. Rozważając już tylko sam zespół tłoka silnika z tuleją cylindrową, przeciwstawne cele minimalizacji tarcia i zmniejszenia zużycia oleju wymagają specyficznego składu oleju. Dlatego też olej smarowy jest obecnie rozumiany jako element konstrukcyjny i jest specjalnie dostosowywany do wymagań technicznych każdego z nowoczesnych układów napędowych. Należy podkreślić, że olej smarowy jest ważnym

czynnikiem mającym wpływ na wielkość regulowanych emisji ograniczonych przez przepisy, w tym takich jak ditlenek węgla. Ma również coraz większy wpływ na wielkość udziału w emisji cząstek stałych. W przypadku napędu elektrycznego olej smarowy powinien poprawiać sprawność mechaniczną i zmniejszać straty hydrauliczne przekładni w celu zmniejszenia zużycia energii elektrycznej i emisji CO<sub>2</sub> pojazdu elektrycznego powstającej podczas produkcji energii elektrycznej. Poprawy sprawności energetycznej silnika elektrycznego można dokonać poprzez optymalizację właściwości cieplnych środka smarowego, tj. przewodności cieplnej, pojemności cieplnej i natężenia przepływu (Gahagan, 2017; van Rensselaar, 2019; Tada et al., 2022). W tym przypadku dodatkowa trudność przy opracowywaniu środków smarowych polega na tym, że do tej pory nie ma sprecyzowanych wymagań technicznych w stosunku do płynów (zarówno środków smarowych, jak i chłodziw) do pojazdów elektrycznych, jako że konstrukcja napędów elektrycznych wciąż się szybko rozwija. Brak jest też wielu znormalizowanych metod badawczych i określenia zakresu niezbędnych badań przedmiotowych płynów (Stępień, 2023a).

### Dalszy rozwój tłokowych silników spalinowych

Od dłuższego czasu rozwój tłokowych silników spalinowych jest uwarunkowany koniecznością systematycznego zmniejszania emisji regulowanych, szkodliwych składników spalin, w tym CO<sub>2</sub>, oraz zmniejszania wielkości zużycia paliwa, a co za tym idzie – zwiększania sprawności silników. Kolejne generacje silników są konstruowane tak, aby spełniać nieustannie zaostżane przepisy w zakresie wielkości emisji wynikające z coraz bardziej rygorystycznych wymogów prawnych. W przypadku silników do pojazdów samochodowych w Europie od 1993 r. obowiązują normy emisji spalin Euro. Ostatnie ich wydanie (Euro 6d) obowiązuje od stycznia 2021 r. Ponadto coraz ambitniejsze cele w zakresie ograniczenia emisji odpowiednimi limitami, w tym CO<sub>2</sub>, są związane z nowymi, bardziej wiarygodnymi testami emisji prowadzonymi w rzeczywistych warunkach jazdy – RDE (ang. *real driving emissions*). Są to decydujące czynniki wymuszające wprowadzanie nowych lub ulepszonych technologii w zakresie rozwoju tłokowych silników spalinowych ze szczególnym naciskiem na ochronę środowiska naturalnego. Strategie osiągnięcia tych celów zakładają działania wielokierunkowe, w tym w przypadku konwencjonalnych silników spalinowych to m.in. opracowywanie coraz bardziej zaawansowanych systemów oczyszczania spalin, stosowanie systemów dezaktywacji pracy cylindrów oraz systemów start–stop. Niezależnie od konstrukcji silnika do jego prawidłowego działania niezbędny jest olej smarowy, coraz częściej przeznaczony do określonej generacji silników,

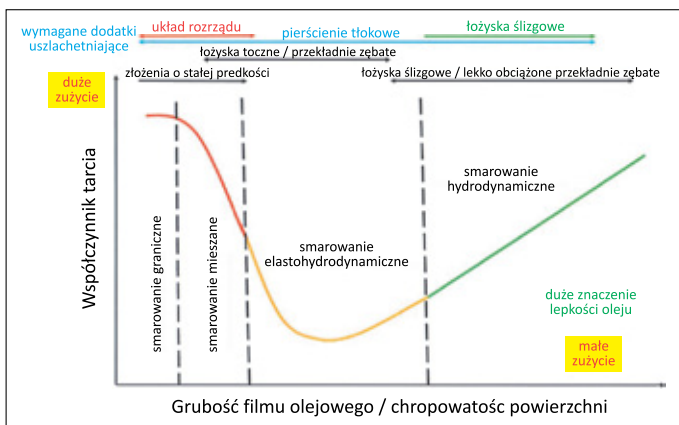
o odpowiedniej jakości określanej poprzez lepkość, zdolności tworzenia i utrzymywania filmu olejowego, odprowadzania ciepła, ochrony powierzchni i utrzymywania wewnętrznej czystości silnika oraz neutralizacji kwasów, a także o zmniejszonym parowaniu oraz zdolności zapobiegania hałasowi i wibracjom. W rezultacie wybór odpowiedniego środka smarowego powinien zwiększyć oszczędność paliwa, zmniejszyć emisję spalin i zwiększyć żywotność silnika (Permude et al., 2012; Kardos i Pietriková, 2016).

Tarcie jest główną przyczyną strat energii w silnikach. Smarowe oleje silnikowe zmniejszają tarcie poprzez tworzenie warstwy smarowej oddzielającej współpracujące elementy metalowe par roboczych, tak aby zapobiec ich kontaktowi (smarowanie hydrodynamiczne). Wykorzystują przy tym modyfikatory tarcia w celu zmniejszenia zużycia elementów roboczych, gdy dochodzi do kontaktu metal–metal (smarowanie graniczne). Lepkość oleju i modyfikatory tarcia bezpośrednio wpływają na wielkość zużycia paliwa przez silnik. Mniejsza lepkość oleju przekłada się na większą oszczędność paliwa, ale równocześnie wiąże się ze zwiększeniem zużycia oleju smarowego przez silnik i zmniejszeniem jego trwałości. Większość strat energii spowodowanych tarciem w silniku jest związana z trzema głównymi zespołami trybologicznymi, tj. zespołem tłoka i tulei cylindrowej, zespołem łożysk ślizgowych oraz zespołem układu rozrządu. Opierając się na charakterystyce trybologicznej, zespół tłoka i tulei cylindrowej smarowany jest hydrodynamicznie, przy czym tarcie mieszane występuje w górnym i dolnym martwym punkcie tłoka, gdzie obciążenia mechaniczne są największe, a prędkość mała. Łożyska ślizgowe są smarowane hydrodynamicznie, z wyjątkiem zimnego rozruchu, który odbywa się w reżimie smarowania elastohydrodynamicznego. W mechanizmie rozrządu mamy do czynienia głównie ze smarowaniem mieszanym/granicznym. Na rysunku 1 przedstawiono zależność współczynnika tarcia od grubości filmu olejowego ze wskazaniem rodzajów smarowania w zespołach trybologicznych uwzględniającego występowanie środka smarowego (Taylor, 2009).

Niespalone paliwo i dodatki do paliwa mogą przedostawać się do oleju smarowego, a w wystarczającym stężeniu powodować problemy takie jak:

- zmniejszenie lepkości oleju smarowego;
- powstawanie osadów i szlamów w silniku;
- przyspieszone utlenianie oleju smarowego, prowadzące do skrócenia okresów między jego wymianami;
- utrata właściwości smarnych.

Od 1 lipca 2030 r. obowiązywać będzie w Europie norma emisji spalin Euro 7. Założono w niej rozszerzenie zakresu wielkości mierzonych cząstek stałych – począwszy od PN10, a nie jak to ma miejsce obecnie od PN23. W związku z tym zwiększy się udział oleju smarowego w tworzeniu cząstek



**Rysunek 1.** Zależność współczynnika tarcia od grubości filmu olejowego ze wskazaniem rodzajów smarowania w zespołach trybologicznych (Taylor, 2009)

**Figure 1.** Dependence of the coefficient of friction on the thickness of the oil film with indication of the types of friction in tribological assemblies (Taylor, 2009)

stałych emitowanych przez silnik. Zwiększone zostaną zatem wymagania w zakresie obniżenia tendencji do tworzenia popiołów pochodzących z olejów smarowych, jak i ograniczyć to stosowanie olejów smarowych o dużej lotności. Duża tendencja do tworzenia popiołu przez olej smarowy może powodować problemy z układem oczyszczania spalin pojazdu. Stopniowo gromadzący się w filtrze cząstek stałych popiół powstały na skutek degradacji oleju smarowego powoduje zablokowanie filtra, co może prowadzić do zwiększenia wielkości ciśnienia wstecznego w układzie wydechowym. Skutkami są zwiększenie zużycia paliwa, zaburzenia w procesie tworzenia mieszanki palnej i jej spalania, a w konsekwencji unieruchomienie silnika. Inne składniki oleju smarowego także mogą powodować problemy. Zawarte w oleju smarowym siarka i fosfor mogą zatruwać powłoki katalityczne elementów układu oczyszczania spalin, co w filtrach cząstek stałych prowadzi do utrudnionego spalania sadzy, powodując zwiększone ciśnienie wsteczne i zwiększone zużycie paliwa.

Zastosowanie dezaktywacji pracy cylindrów w zależności od wielkości obciążenia pracującego silnika wpływa w istotny sposób na warunki trybologiczne współdziałania pierścieni tłoka z tuleją cylindrową. Aktywne cylindry wykazują zmniejszenie minimalnej grubości filmu smarnego o około 10% i zwiększenie siły tarcia między pierścieniami tłokowymi a tuleją cylindrową w porównaniu z silnikiem, w którym nie zastosowano systemu dezaktywacji cylindrów. W praktyce oznacza to około 30-proc. wzrost strat mocy spowodowanych tarciami. Inną wadą systemu dezaktywacji cylindrów jest zwiększenie przedmuchów gazów spalinowych z cylindrów aktywnych spowodowany wzrostem ciśnienia w takim cylindrze. Powoduje to przyspieszoną degradację smarowego oleju silnikowego (Abril et al., 2022). Opisanie wyżej skutki

stosowania dezaktywacji pracy cylindrów stanowią nowe wyzwania dla smarowego oleju silnikowego.

Jak powszechnie wiadomo, największe zużycie silnika występuje podczas zimnego rozruchu, a niewiele mniejsze podczas rozruchu na ciepło. Liczba rozruchów nagrzanego silnika jest znacznie zwielowrotniona na skutek stosowania systemów start–stop. Oznacza to takie samo zwielowrotnienie przypadków smarowania granicznego różnych złożeń roboczych silnika i narażenie łożysk na zwiększone zużycie. W takim przypadku, aby przeciwdziałać procesom przedwczesnego zużycia elementów węzłów ciernych, niezbędne jest stosowanie wysokiej jakości syntetycznego oleju smarowego z odpowiednimi modyfikatorami tarcia i dodatkami uszlachetniającymi zwiększającymi zdolność do tworzenia i utrzymywania filmu olejowego.

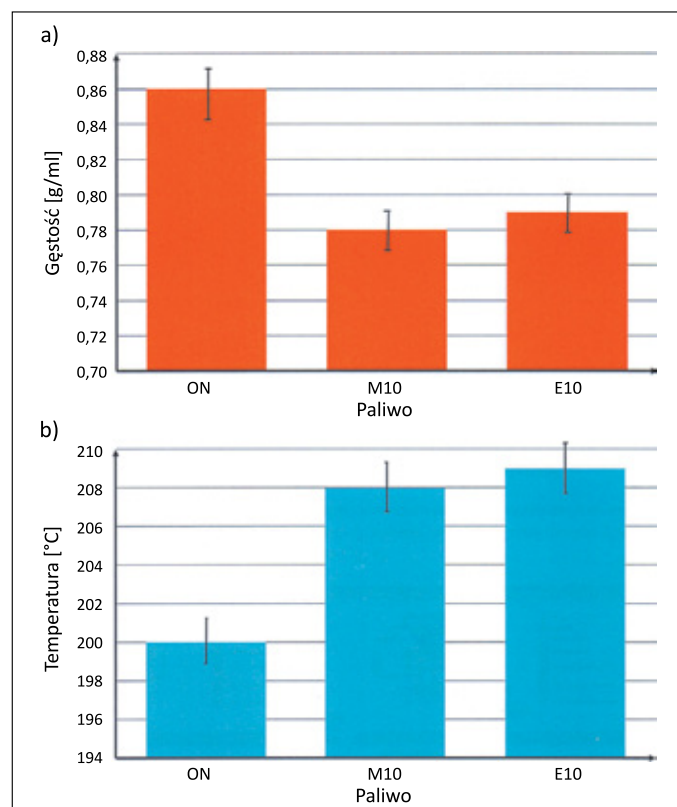
### Silniki spalinowe zasilane paliwami z biokomponentami

Domieszka bioetanolu do benzyny silnikowej zwiększa tendencję przedostawania się paliwa do skrzyni korbowej silnika i przyspiesza proces rozcieńczania oleju smarowego z powodu większego ciepła parowania takiego paliwa (Boons et al., 2008). Wyniki dotychczas przeprowadzonych badań wykazały ogólnie, że domieszka etanolu do paliwa węglowodorowego, które przedostało się do oleju smarowego, ma istotny wpływ na właściwości tego oleju, takie jak: zmniejszenie lepkości i całkowitej liczby zasadowej, zwiększenie całkowitej liczby kwasowej, pogorszenie właściwości smarnych oleju, a także zwiększenie tendencji do tworzenia osadów w wyniku utleniania etanolu (Lapuerta et al., 2008). W jednym z przeprowadzonych badań (Khuong et al., 2017) wykazano, że zmieszanie z w pełni syntetycznym olejem smarowym 6% benzyny zawierającej 10% (v/v) lub 20% (v/v), lub 30% (v/v), lub 85% (v/v) domieszki bioetanolu spowodowało znaczne zmniejszenie lepkości oleju smarowego, sięgające do około 30% w przypadku benzyny, w której domieszka wynosiła 85% (v/v). Zmiany w lepkości każdej rozcieńczonej próbki oleju były bardzo podobne, niezależnie od ilości bioetanolu zawartego w rozcieńczającym olej smarowy benzynie. Zmniejszanie lepkości oleju smarowego na skutek przedostawania się do niego benzyny z bioetanolom może powodować dwa przeciwstawne efekty. Efekt korzystny polega na tym, że zmniejszenie lepkości oleju smarowego przy utrzymaniu smarowania hydrodynamicznego zmniejszy ogólnie tarcie w silniku i zwiększy jego sprawność mechaniczną, jednak tylko do czasu pojawienia się smarowania granicznego (Cousseau et al., 2016). W przypadku występowania smarowania granicznego różnica w lepkości oleju smarowego nie ma już istotnego wpływu na tarcie. Efektem

niekorzystnym zmniejszenia lepkości oleju smarowego jest zmniejszenie grubości filmu smarowego, co prowadzi początkowo do występowania smarowania granicznego, powodującego zwiększenie tarcia współpracujących powierzchni i ich zużycia. Wskazano równocześnie, że już w temperaturze 75°C etanol całkowicie wyparowuje ze smarowego oleju silnikowego, co przywraca jego pierwotne właściwości. W opisanych powyżej badaniach stwierdzono też, że syntetyczny olej smarowy rozcieńczony benzyną z domieszką bioetanolu charakteryzował się większą liczbą kwasową, co zmniejszyło jego ochronę przeciwkorozyjną smarowanych powierzchni (Khuong et al., 2017). Etanol ma właściwości higroskopijne i wiąże się z wodą. Po przedostaniu się etanolu do oleju smarowego może on tworzyć emulsje z olejem smarowym i powodować powstawanie szlamów niskotemperaturowych (Khuong et al., 2016). Ponadto rozcieńczony paliwem z biokomponentem olej smarowy ma większe tendencje do generowania zjawiska *low-speed pre-ignition*. Duża lotność benzyny sprawia, że w wyższej temperaturze roboczej (100–150°C) większość benzyny odparuje z oleju smarowego, chociaż możliwe jest, że niektóre składniki o większej masie cząsteczkowej, w szczególności dodatki uszlachetniające benzynę, mogą gromadzić się w oleju smarowym pomiędzy jego wymianami (Taylor, 2021). Etanol, jak i metanol mogą też stanowić domieszki do oleju napędowego. Badania przeprowadzone z olejem napędowym z domieszką 10% (v/v) etanolu (E10) lub 10% (v/v) metanolu (M10), rozcieńczającymi smarowy olej silnikowy klasy lepkościowej SAE 15W-40, podczas pracy silnika wykazały zmniejszenie gęstości oleju smarowego poddanego działaniu zarówno paliwa E10, jak i M10 – rysunek 2a (Chowdary et al., 2019).

Olej smarowy rozcieńczony olejem napędowym z biokomponentami E10 lub M10 zawierał też mniej zanieczyszczeń stałych, w tym pierwiastków metalicznych, w porównaniu z olejem smarowym rozcieńczonym olejem napędowym bez biokomponentów (Chowdary et al., 2019). Zaobserwowano też 5-proc. spadek temperatury zapłonu oleju napędowego niezawierającego alkoholu w porównaniu z olejem napędowym zawierającym alkohol (B10, M10) – rysunek 2b (Chowdary et al., 2019; Stępień, 2020).

W przypadku stosowania w oleju napędowym domieszki FAME (estrów metylowych kwasów tłuszczowych) oddziaływanie takiego paliwa na smarowy olej silnikowy prowadzi do znacznego przyspieszenia procesów utleniania oleju smarowego i skrócenia okresów między jego wymianami (Richard i McTavish, 2009). Ponadto olej napędowy zawierający FAME, przedostając się do smarowego oleju silnikowego, powoduje zmniejszenie jego lepkości, zwiększenie kwasowości i zwiększoną korozję powierzchni elementów smarowanych takim olejem smarowym (Pereira et al., 2020).



**Rysunek 2.** Zmiany gęstości (a) i temperatury zapłonu (b) smarowego oleju silnikowego rozcieńczonego olejem napędowym albo paliwem E10 lub M10 (Chowdary et al., 2019)

**Figure 2.** Changes in density (a) and flash point (b) of engine oil diluted with diesel fuel or E10 or M10 fuel (Chowdary et al., 2019)

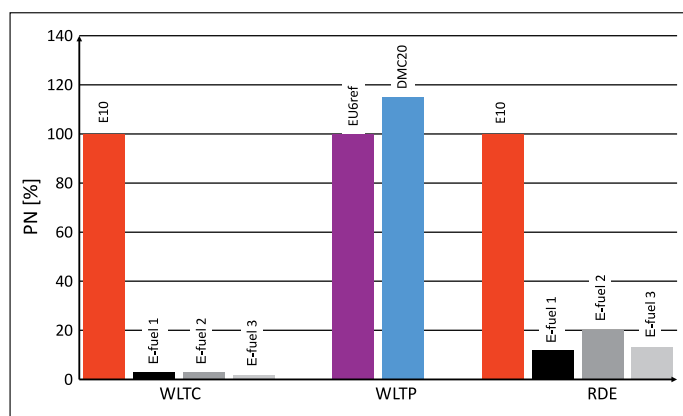
### Silniki spalinowe zasilane paliwami syntetycznymi

Paliwa syntetyczne opisywane jako e-paliwa to paliwa powstające w procesie syntezy z wykorzystaniem odnawialnej energii elektrycznej, często przy użyciu nieorganicznych surowców. E-paliwa obejmują ciekłe i gazowe węglowodory, takie jak metan i różne paliwa podobne do benzyny, olej napędowy, alkohole, takie jak etanol i metanol, oraz paliwa niezawierające węgla, takie jak wodór i amoniak. Po zakończeniu procesu rafinacji wyprodukowane e-paliwa mogą być wykorzystywane jako e-benzyna, e-olej napędowy, e-olej opałowy i e-kerozyna. Jedynym jak dotąd e-paliwem do silników ZI spełniającym wymagania paliwa syntetycznego drugiej generacji w zakresie pełnego spalania bez tworzenia cząstek sadzy oraz bez szkody dla środowiska i zdrowia jest mieszanina węglanu dimetylu (DMC) i mrówczanu metylu (MF), zwana DMC+. Charakteryzuje się ona bardzo dobrymi właściwościami przeciwstukowymi (RON/MON > 110) (Wen et al., 2010; Grill et al., 2020). Obecnie produkowane paliwa syntetyczne, w tym e-paliwa, muszą spełniać wymagania normy EN 228 lub EN 590. W takim przypadku określa się je jako paliwa drop-in, a zatem możliwe do bezpośredniego

stosowania w obecnych silnikach spalinowych jako paliwa samoistne lub jako domieszki do konwencjonalnych paliw węglowodorowych (Stępień, 2023b). Przeprowadzone testy trzech różnych e-benzyn w samochodzie spełniającym wymagania Euro 6d-temp na hamowni podwoziowej w cyklach WLTC i RDE (Krajinska et al., 2021) wykazały, że e-paliwa nie są paliwami o czystym spalaniu i poza emisją cząstek stałych w niewielkim stopniu przyczynią się do zmniejszenia emisji toksycznych zanieczyszczeń, zarówno regulowanych, jak i nieregulowanych, w porównaniu z paliwem E10. Badaniom poddano następujące paliwa:

- E-fuel 1: e-paliwo w 100% parafinowe, składające się w 100% z łańcuchów węglowodorowych, bez węglowodorów o kształcie pierścienia z elektronami zdelokalizowanymi, takich jak benzen (tj. węglowodory aromatyczne) (Krajinska et al., 2021);
- E-fuel 2: 90% parafinowego e-paliwa, 10% aromatycznego e-fuel (Krajinska et al., 2021);
- E-fuel 3: 90% parafinowego e-paliwa, 10% etanolu drugiej generacji. Dodanie etanolu do parafinowej mieszanki e-fuels spowodowało duże problemy z mieszalnością, co wymusiło konieczność dodania do tak przygotowanej mieszanki 1% oleju fuzlowego, aby nie doszło do oddzielenia etanolu (Krajinska et al., 2021).

Jako paliwo wzorcowe (odniesienia), reprezentatywne dla obecnego europejskiego rynku paliw, stosowano homologacyjną mieszankę paliwową E10 zgodną z normą EN 228 i rozporządzeniem UE 2008/692/WE. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały szczególnie pozytywny wpływ benzyny z domieszką paliwa syntetycznego na zmniejszenie emisji cząstek stałych – rysunek 3 (Stępień, 2023b).



**Rysunek 3.** Zmiany średniego poziomu emisji PN (>23 nm) dla różnych paliw syntetycznych w porównaniu z konwencjonalnymi paliwami ropopochodnymi zmierzone w różnych testach (Scharrer et al., 2019; Krajinska et al., 2021)

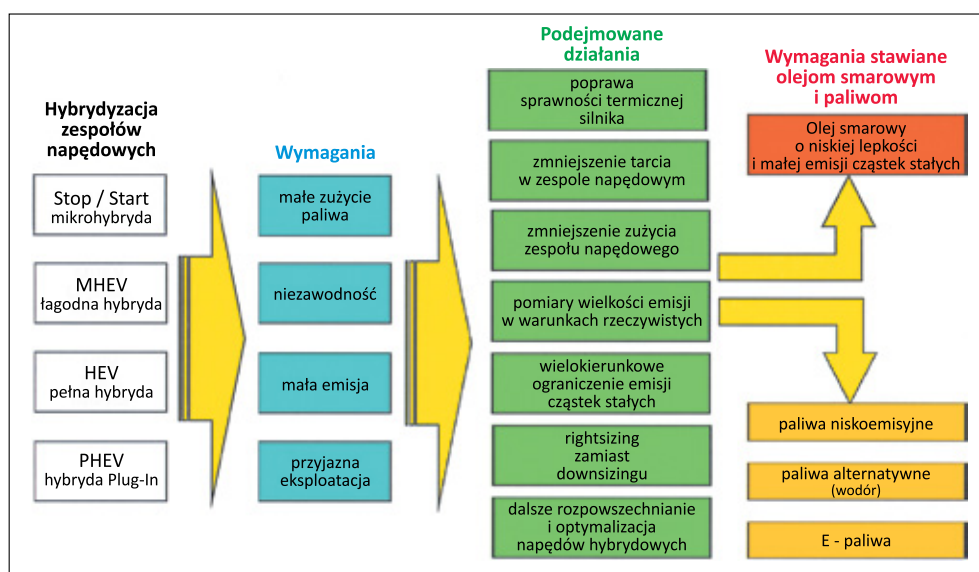
**Figure 3.** Changes in average PN emissions (>23 nm) for different synthetic fuels compared to conventional petroleum-based fuels measured in various tests (Scharrer et al., 2019; Krajinska et al., 2021)

W przypadku każdego z trzech zbadanych e-paliw zaobserwowano duże zmniejszenie emisji PN w porównaniu z paliwem E10 w testach WLTC i RDE. Zmniejszenie emisji cząstek stałych dla e-paliw było prawdopodobnie związane głównie z małą zawartością związków aromatycznych: <0,1% w e-paliwach 1 i 3 oraz 10% w e-paliwie 2 w porównaniu z 26% w paliwie E10. W przypadku paliw konwencjonalnych udział smarowego oleju silnikowego w tworzeniu cząstek stałych wynosi od około 5% do 50% i zależy od warunków pracy silnika (prędkości obrotowej i wielkości obciążenia). Zatem w przypadku paliw zawierających już tylko domieszkę paliwa syntetycznego udział smarowego oleju silnikowego w tworzeniu cząstek stałych będzie dużo większy, co stanowi ogromne wyzwanie dla producentów środków smarowych, jako że emisja cząstek stałych postrzegana jest jako jedna z najbardziej szkodliwych dla zdrowia człowieka.

### Hybrydowe zespoły napędowe

W ostatnim dziesięcioleciu nastąpił szczególnie szybki rozwój hybrydowych zespołów napędowych pozwalających łączyć zalety konwencjonalnych silników spalinowych z napędami elektrycznymi. Równolegle rozwijane są różne typy hybrydowych zespołów napędowych w dążeniu do poprawy ich sprawności, ograniczenia emisji regulowanych i nieregulowanych szkodliwych składników spalin do zmniejszonych limitów oraz poprawy walorów użytkowych pojazdów (Tran D.-D. et al., 2020; Zhuang et al., 2020; Tran M.-K. et al., 2021). Prowadzi to do dalszego rozwoju konstrukcji silników spalinowych oraz coraz częściej do stosowania paliw niskoemisyjnych (rysunek 4).

Wyzwania stawiane olejom smarowym przez hybrydowe zespoły napędowe wynikają przede wszystkim z wymagań konstrukcyjnych silników spalinowych, coraz częściej opracowywanych jako przeznaczone do napędów hybrydowych, tzw. e-ICE. Wymagania te obejmują konieczność zapewnienia niezakłóconej stabilnej pracy złożonych układów oczyszczania spalin, a przede wszystkim dostosowania oleju smarowego do odmiennych trybów pracy silnika spalinowego jako elementu układu hybrydowego. W przypadku pełnej hybrydy i hybrydy typu plug-in ich tryby pracy można podzielić na dwie kategorie: stopniowe rozładowywanie akumulatora, w którym stan naładowania akumulatora stale zmniejsza się, oraz podtrzymywanie stanu naładowania, gdy stopień naładowania utrzymywany jest w przybliżeniu na takim samym poziomie. Przy tym trybie rozładowywania akumulatora silnik spalinowy może pozostać całkowicie wyłączony lub okresowo współdziałać z silnikiem elektrycznym w określonych warunkach jazdy (zazwyczaj przy dużym przyspieszeniu lub obciążeniu). W takim trybie

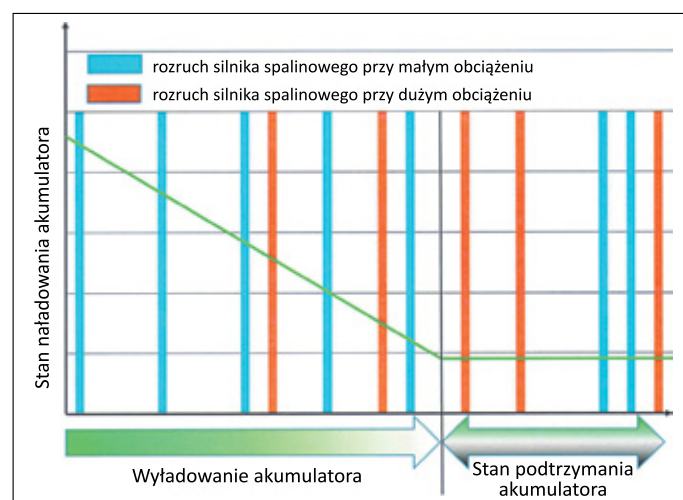


**Rysunek 4.** Kierunki hybrydyzacji zespołów napędowych wraz ze stawianymi im wymaganiami, podejmowanymi działaniami i wyzwaniami stawianymi olejom smarowym (Infineum International Limited, 2021, za: AVL)

**Figure 4.** Powertrain hybridization trends with requirements, actions taken and challenges for lubricating oils (Infineum International Limited, 2021, after: AVL)

„mieszany” silnik wykonuje szereg zimnych rozruchów w warunkach dużej prędkości obrotowej zespołu napędowego i jego dużego obciążenia. Warunki takiego rozruchu silnika znacznie różnią się od większej liczby miejskich rozruchów zimnego silnika (typu start–stop) wykonywanych przy małej prędkości obrotowej i małym obciążeniu (rysunek 5).

W warunkach rozruchu przy dużej prędkości i obciążeniu rośnie zagrożenie związane z występowaniem skokowego zwiększenia emisji cząstek stałych, zwłaszcza tych o bardzo małych wielkościach (<23 nm), co stwarza nowe wymagania dla układów oczyszczania spalin (Zhang et al., 2020). W obu



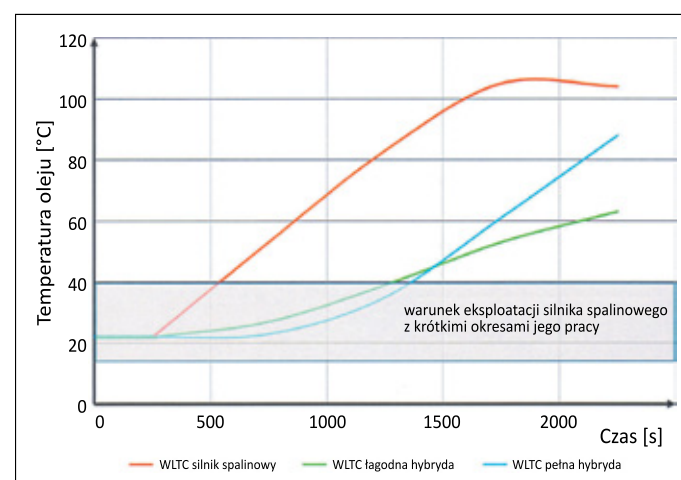
**Rysunek 5.** Tryby pracy silnika spalinowego w przypadku pełnej hybrydy i hybrydy typu plug-in (SAE 2020-01-0354)

**Figure 5.** Internal combustion engine modes for full hybrid and plug-in hybrid (SAE 2020-01-0354)

typach zimnego rozruchu silnik pracuje przez krótki czas, co nie pozwala na duże nagrzanie oleju smarowego, szczególnie w zimnym klimacie. W warunkach testowych Worldwide Harmonized Test Cycle (WLTC) temperatura oleju w pojeździe napędzanym silnikiem spalinowym zazwyczaj zwiększa się do ponad 100°C przed końcem drugiej części cyklu testowego. W przypadku symulowanych testów WLTC pojazdów hybrydowych – stan naładowania akumulatora jest różny (Tran D.-D. et al., 2020; Zhuang et al., 2020; Tran M.-K. et al., 2021). Częstotliwość zimnych rozruchów silnika spalinowego jest dostosowana do stopnia naładowania akumulatora i warunków pracy zespołu napędowego. W takim

przypadku temperatura oleju smarowego pozostaje o 20°C do 40°C niższa w porównaniu z olejem w silniku spalinowym stanowiącym jedyne źródło napędu samochodu, ponieważ w napędzie hybrydowym e-ICE jest wyłączony przez znaczny okres pełnego cyklu WLTC (rysunek 6).

Utrzymujące się podczas eksploatacji pojazdu małe wartości temperatury oleju smarowego stwarzają szereg problemów. W takich warunkach woda i niespalone paliwo mogą gromadzić się w oleju smarowym w skrzyni korbowej, a ich zawartość w oleju smarowym może przekraczać nawet 10% i sprzyjać



**Rysunek 6.** Przebieg temperatury oleju smarowego silnika w czasie cyklu WLTC w zależności od rodzaju zespołu napędowego (Infineum International Limited, 2021, za: AVL)

**Figure 6.** The course of the engine oil temperature during the WLTC depending on powertrain type (Infineum International Limited, 2021, after: AVL)

tworzeniu się różnych rodzajów emulsji środka smarnego, osłabiając jego zdolność do ochrony silnika. Ponadto woda zawarta w oleju smarowym może powodować zmniejszenie jego lepkości i osłabienie filmu smarowego. Jest to szczególnie niebezpieczne w przypadku olejów o bardzo małej lepkości, takich jak SAE 0W-12 i 0W-8, które coraz częściej są stosowane w nowoczesnych silnikach spalinowych.

### Silniki spalinowe zasilane wodorem

W przypadku stosowania wodoru jako paliwa do tłokowych silników spalinowych rozwiązania wymagają dwa zasadnicze problemy związane ze smarowaniem. Pierwszy dotyczy bardzo małej smarnośći wodoru, co powoduje przedwczesne zużycie współpracujących ze sobą elementów, jak zawory dolotowe i przyłgnie gniazd zaworowych silnika, iglice wtryskiwaczy i ich gniazda (utrata szczelności). Drugi problem jest związany z odmiennie postępującymi procesami utraty smarnośći oleju smarowego w silniku zasilanym wodorem. W takim przypadku olej smarowy jest szybko rozcieńczany dużą ilością wody, przedostającej się do niego w wyniku procesu spalania wodoru. Powoduje to szybkie zmniejszanie lepkości kinematycznej oleju smarowego podczas eksploatacji i wyczerpywanie się potencjału dodatków przeciwzatarciowych i smarnośćiowych, a to skutkuje szybką utratą własności smarnych oleju. Wymusza to znaczne skrócenie okresów między wymianami oleju smarowego. Ponadto mała odległość gaszenia wodoru powoduje zwiększone odparowanie oleju smarowego ze ścianek cylindrów i formowanie się cząstek stałych (Falfari et al., 2023). W konsekwencji do smarowania tłokowych silników spalinowych zasilanych wodorem zaleca się stosowanie niskopopiołowych, syntetycznych olejów smarowych o bardzo dobrych właściwościach demulgujących (Stępień i Urzędowska, 2021).

### Silniki spalinowe zasilane amoniakiem

Do tej pory dostępnych jest bardzo mało informacji dotyczących badań interakcji między silnikowymi olejami smarowymi a amoniakiem stosowanym jako paliwo do tłokowych silników spalinowych. Obecnie paliwo takie jest wykorzystywane bardzo rzadko. Ogólnie na właściwości użytkowo-eksploatacyjne oleju smarowego, kierunek i szybkość jego degradacji, w tym wyczerpywanie się jego dodatków uszlachetniających i tworzenie produktów degradacji oleju, duży wpływ ma oddziałujące na niego paliwo (Besser et al., 2019; Agocs et al., 2022). Podczas spalania amoniaku wytwarzane są duże ilości tlenków azotu, co sprawia, że wymagane oczyszczanie spalin jest zazwyczaj związane ze stosowaniem układu selektywnej

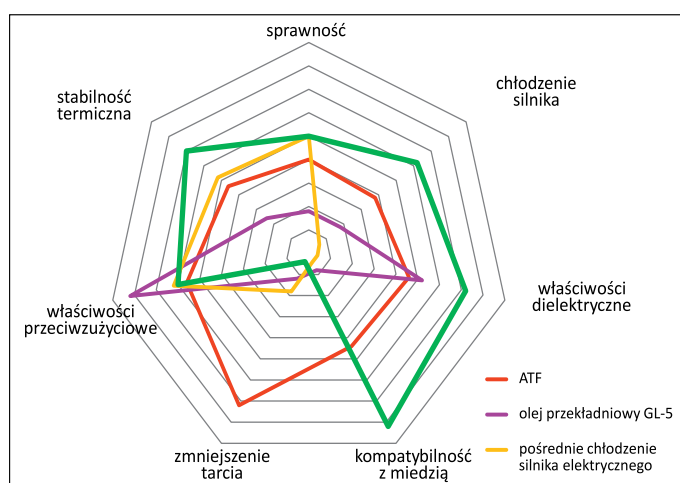
redukcji katalitycznej (ang. *selective catalytic reduction*, SCR). Dotychczas przeprowadzone badania wykazały, że oddziaływanie przedostającego się ze spalinami do miski olejowej silnika  $\text{NO}_2$  powstałego podczas spalania amoniaku powodowało przyspieszone utlenianie i w następstwie znaczny wzrost liczby kwasowej oraz lepkości kinematycznej smarowego oleju silnikowego (Dörr et al., 2019; Agocs et al., 2022). Stechiometryczna mieszanka powietrza z amoniakiem powoduje silną korozję elementów miedzianych.  $\text{NH}_3$  stanowi zatem potencjalne zagrożenie dla części silnika zawierających miedź. Dlatego zaleca się, aby oleje smarowe stosowane do silników zasilanych  $\text{NH}_3$  zawierały m.in. specyficzne inhibitory korozji, aby przeciwdziałać możliwym uszkodzeniom istotnych elementów silnika. Inne wyniki badań wpływu oddziaływania  $\text{NH}_3$  na smarowy olej silnikowy wykazały znacznie zwiększone tendencje do tworzenia osadów silnikowych zarówno w warunkach statycznych (miska olejowa silnika), jak i dynamicznych (pierścienie i rowki tłoków). Obecność  $\text{NH}_3$  nawet w śladowym stężeniu (1000 ppm) spowodowała powstawanie dużych osadów w silniku pomimo niskich wielkości utlenienia i małej liczby kwasowej oleju smarowego. Ponadto stwierdzono znaczne pogorszenie właściwości trybologicznych oleju smarowego poddanego działaniu  $\text{NH}_3$  na skutek około 55-proc. zmniejszenia zdolności do przenoszenia obciążeń przez warstwę oleju smarowego, a wynika z tego przedwczesne wystąpienie obciążenia niszczącego (Agocs et al., 2022).

### Elektryczne zespoły napędowe

W przypadku elektrycznych układów napędowych coraz częściej olej smarowy stosowany w skrzyniach biegów pełni równocześnie funkcję płynu do chłodzenia silników elektrycznych z chłodzeniem bezpośrednim. W takim przypadku olej smarowy ma bezpośredni kontakt z elementami zespołów elektrycznych, co sprawia, że bardzo ważne są jego właściwości elektroizolacyjne (Narita i Takekawa, 2019). Równocześnie olej smarowy, pozostając w kontakcie z miedzianymi uzwojeniami silnika elektrycznego, musi też przeciwdziałać korozji miedzi (Beyer et al., 2019). Ponadto duża ilość ciepła wytwarzanego w uzwojeniach silnika wymaga odprowadzenia go przez olej smarowy przy zachowaniu jego stabilności termicznej. Jak się ocenia, straty energii wynikające z oporów ruchu (mieszania oleju) powodowanych lepkością oleju smarowego mogą stanowić nawet 50–70% całkowitych strat energii w skrzyni biegów (Narita i Takekawa 2019; Iino et al., 2021). Dlatego też do smarowania elektrycznych zespołów napędowych stosuje się wyłącznie oleje smarowe o małej lepkości, które są także bardziej efektywne w odbieraniu i przenoszeniu ciepła (Stępień, 2023a). Zmniejszenie lepkości oleju prowadzi zazwyczaj do



powstania cieńszych warstw oleju smarowego, co zwiększa procesy mechanicznego zużycia współpracujących ze sobą elementów na skutek pogorszenia warunków smarowania. Powoduje to problemy związane z przyspieszonym zużyciem współpracujących powierzchni i możliwością zatarcia (Stępień, 2023a). Należy też wziąć pod uwagę, że w budowie elektrycznych zespołów napędowych stosuje się wiele różnych materiałów, które nie są wykorzystywane w napędach spalinowych. Niekompatybilność środka smarowego z powłokami izolacyjnymi pokrywającymi przewody elektryczne lub dopuszczanie do występowania korozji miedzi może prowadzić do upływów prądu elektrycznego lub do zwarcia. Dlatego kompatybilność środków smarowych z przewodami i połączeniami miedzianymi, elastomerami, polimerami i innymi tworzywami stosowanymi w układach elektrycznych jest jednym z najważniejszych wymagań stawianych środkom smarowym do elektrycznych zespołów napędowych (Chen et al., 2020). Na rysunku 7 przedstawiono porównanie najważniejszych wymagań stawianych olejom smarowym do elektrycznych zespołów napędowych względem środków smarowych do przekładni klasycznych zespołów napędowych.



**Rysunek 7.** Porównanie najważniejszych wymagań stawianych olejom smarowym do elektrycznych zespołów napędowych względem środków smarowych do przekładni klasycznych zespołów napędowych

**Figure 7.** Comparison of the most important requirements for lubricating oils for electric powertrains with respect to lubricants for the transmissions of conventional powertrains

## Wnioski

1. Istnieje potrzeba opracowania różnych środków smarowych współdziałających z różnymi paliwami do strukturalnie i technologicznie różnych układów napędowych.
2. Konieczne jest opracowanie nowych klas olejów smarowych do nowych typów układów napędowych wykorzystujących

różne paliwa, często obecnie niestosowane lub mało popularne.

3. Niezależnie od typu pojazdu i układu napędowego przyszłe środki smarowe powinny poprawiać sprawność mechaniczną i zmniejszać straty hydrauliczne w mechanizmach, w których będą stosowane, w celu zmniejszenia zużycia energii i emisji CO<sub>2</sub>.
4. Zmniejszenie emisji substancji szkodliwych związanych z olejem smarowym jest obecnie kluczową drogą do dalszego zmniejszania emisji spalin i spełnienia rygorystycznych przepisów, zwłaszcza dotyczących emisji cząstek stałych.
5. Spalanie oleju smarowego przedostającego się do komór spalania cylindrów silnika, czy to przez odparowanie filmu olejowego, czy przez przedmuchiwanie kropelek oleju przez szczeliny pierścieni tłokowych z miski olejowej, ma bezpośredni wpływ na emisję szkodliwych składników spalin.
6. Pełna ocena wydajności i adaptacji środków smarowych do nowych konstrukcji układów napędowych i warunków pracy, a także stosowanych paliw wymaga opracowania zupełnie nowych lub dostosowania istniejących metod testowych do wielokierunkowego testowania olejów smarowych

## Literatura

- Abril S.O., Fonseca-Vigoya M.D., García C.P., 2022. Study of the Cylinder Deactivation on Tribological Parameters and Emissions in an Internal Combustion Engine. *Lubricant*, 10(4): 60. DOI: 10.3390/lubricants10040060.
- Agocs A., Besser C., Brenner J., Budnyk S., Frauscher M., Dörr N., 2022. Engine Oils in the Field: A Comprehensive Tribological Assessment of Engine Oil Degradation in a Passenger Car. *Tribology Letters*, 70(1). DOI: 10.1007/s11249-022-01566-7.
- AVL. Prezentacja w zasobach prywatnych autora artykułu.
- Besser C., Agocs A., Ronai B., Ristic A., Repka M., Janke E., McAleese C., Dörr N., 2019. Generation of engine oils with defined degree of degradation by means of a large scale artificial alteration method. *Tribology International*, 132. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.12.003.
- Beyer M., Brown G., Gahagan M., Higuchi T., Hunt G., Huston M., Jayne D., McFadden Ch., Newcomb T., Patterson S., Prengaman Ch., Shamszad M., 2019. Lubricant Concepts for Electrified Vehicle Transmissions and Axles. 2019. *Tribology Online*, 14(5): 428–437. DOI: 10.2474/trol.14.428.
- Boons M., Bulk R. van den, King T., 2008. The Impact of E85 Use on Lubricant Performance. *SAE Technical Paper* 2008-01-1763. DOI: 10.4271/2008-01-1763.
- Chen Y., Jha S., Raut A., Zhang W., Liang H., 2020. Performance Characteristics of Lubricants in Electric and Hybrid Vehicles: A Review of Current and Future Needs. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 6. DOI: 10.3389/fmech.2020.571464.
- Chowdary K., Tated M.K., Kotia A., 2019. Effect of Methanol and Ethanol on lubrication oil degradation of CI engine. *Journal of the Gujarat Research Society*, 21(8): 155–166.
- Cousseau T., Ruiz Acero J.S., Sinatora A., 2016. Tribological response of fresh and used engine oils: The effect of surface texturing, roughness and fuel type. *Tribology International*, 100: 60–69. DOI: 10.1016/j.triboint.2015.11.016.
- Dörr N., Agocs A., Besser C., Ristic A., Frauscher M., 2019. Engine Oils in the Field: A Comprehensive Chemical Assessment of

- Engine Oil Degradation in a Passenger Car. *Tribology Letters*, 67(3). DOI: 10.1007/s11249-019-1182-7.
- Falfari S., Cazzoli G., Mariani V., Bianchi G.M., 2023. Hydrogen Application as a Fuel in Internal Combustion Engines. *Energies*, 16(6): 2545. DOI: 10.3390/en16062545.
- Gahagan M.P., 2017. Lubricant Technology for Hybrid Electric Automatic Transmissions. *SAE Technical Paper* 2017-01-2358. DOI: 10.4271/2017-01-2358.
- Grill M., Wagner R., Keskin M.T., 2020. Potential analysis and virtual development of SI Engines operated with synthetic fuel DMC+. *SAE Technical Paper Series* 2020-01-0342. DOI: 10.4271/2020-01-0342.
- Hosseini S.E., Butler B., 2020. An overview of development and challenges in hydrogen-powered vehicles. *International Journal of Green Energy*, 17(1): 13–37. DOI: 10.1080/15435075.2019.1685999.
- Iino M., Tada A., Masuda K., Matsuki S., Onumata Y., 2021. Drivetrain Lubricants with High Cooling and Efficiency-Boosting Properties for Electric Vehicles. *SAE Technical Paper* 2021-01-1215. DOI: 10.4271/2021-01-1215.
- Kardos S., Pietriková A., 2016. Evaluation of Motor Oil Characteristics and Degradation Factors for Possibilities of Continuous Diagnostics. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 16: 20–24. DOI: 10.15546/aei-2016-0010.
- Khuong L.S., Masjuki H.H., Zulkifli N.W., Niza Mohamad E., Kalam M.A., Abdullah Alabdulkarem, Arslan A., Mosarof M.H., Syahira A.Z., Jamshaida M., 2017. Effect of gasoline–bioethanol blends on the properties and lubrication characteristics of commercial engine oil. *The Royal Society of Chemistry*, 7: 15005–15019. DOI: 10.1039/C7RA00357A.
- Khuong L.S., Zulkifli N.W.M., Masjuki H.H., Mohamad E.N., Arslan A., Mosarof M.H., Azham A., 2016. A review on the effect of bioethanol dilution on the properties and performance of automotive lubricants in gasoline engines. *RSC Advances*, 6(71): 66847–66869. DOI: 10.1039/C6RA10003A.
- Korn T., Nobile R.F., Grassinger D., 2021. Zero-emission, maximum performance – the latest generation of hydrogen combustion engines. *42<sup>nd</sup> International Vienna Motor Symposium*, 29–30 April.
- Krajinska A., Poliscanova J., Earl Y., Gimbert Y., Decock G., Rangaraju S., 2021. Magic green fuels. *Transport & Environment*. <<https://www.transportenvironment.org/discover/magic-green-fuels-why-synthetic-fuels-in-cars-will-not-solve-europes-pollution-problems/>> (dostęp: 7.04.2022).
- Lapuerta M., Armas O., Herreros J.M., 2008. Emissions from a diesel–bioethanol blend in an automotive diesel engine. *Fuel*, 87(1): 25–31. DOI: 10.1016/j.fuel.2007.04.007.
- Narita K., Takekawa D., 2019. Lubricants Technology Applied to Transmissions in Hybrid Electric Vehicles and Electric Vehicles. *SAE Technical Paper* 2019-01-2338. DOI: 10.4271/2019-01-2338.
- Pereira F.M., Velásquez J.A., Riechi J.L., Teixeira J., Ronconi L., Riolfi S., Karas É.L., Abreu R.A., Travain J.C., 2020. Impact of pure biodiesel fuel on the service life of engine-lubricant: A case study. *Fuel*, 261: 116418.
- Permude A., Pathak M., Kumar V., Singh S., 2012. Influence of Low Viscosity Lubricating Oils on Fuel Economy and Durability of Passenger Car Diesel Engine. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 5(3): 1426–1435. DOI: 10.4271/2012-28-0010.
- Richard K.M., McTavish S.J., 2009. Impact of Biodiesel on Lubricant Corrosion Performance. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2(2): 66–71. DOI: 10.4271/2009-01-2660.
- Scharrer O., Wieske P., Warth M., Schwarzenthal D., Dums K., Wasserbäch T., 2019. Uncompromisingly fun to drive thanks to synthetic fuel blend. *40<sup>th</sup> International Vienna Motor Symposium*, May 15–17. DOI: 10.51202/9783186811127.
- Sens M., Danzer C., Essen C. von, Brauer M., Wascheck R., Seebode J., Kratzsch M., 2021. Hydrogen powertrains in competition to fossil fuel-based internal combustion engines and battery electric powertrains. *42<sup>nd</sup> International Vienna Motor Symposium*, 29–30 April.
- Stępień Z., 2020. Potencjał użytkowo-eksploatacyjny butanolu jako paliwa alternatywnego do zasilania silników ZI. *Nafta-Gaz*, 76(2): 126–135. DOI: 10.18668/NG.2020.02.07.
- Stępień Z., 2021. A Comprehensive Overview of Hydrogen Fueled Internal Combustion Engines: Achievements and Future Challenges. *Energies*, 14(20): 6504. DOI: 10.3390/en14206504.
- Stępień Z., 2023a. Specyfika środków smarowych do zespołów napędowych samochodów elektrycznych. *Nafta-Gaz*, 79(2): 131–140. DOI: 10.18668/NG.2023.02.07.
- Stępień Z., 2023b. Synthetic Automotive Fuels. *Combustion Engines*, 192(1): 78–90. DOI: 10.19206/CE-152526.
- Stępień Z., Urzędowska W., 2021. Łokowe silniki spalinowe zasilane wodorem – wyzwania. *Nafta-Gaz*, 77(12): 830–840. DOI: 10.18668/NG.2021.12.06.
- Tada A., Aizawa K., Susukida Y., Tokozakura D., Nakamura T., Sano T., Shinyoshi T., 2022. Development of Transaxle Fluid for Electrification Vehicles: Design of Novel Additive Formulation. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, 5(3): 1055–1062. DOI: 10.4271/2022-01-1102.
- Taylor R.I., 2009. Tribology & Energy Efficiency. *World Tribology Congress, Kyoto, Japan*.
- Taylor R.I., 2021. Fuel-Lubricant Interactions: Critical Review of Recent Work. *Lubricants*, 9(9): 92–108. DOI: 10.3390/lubricants9090092.
- Tran D.-D., Vafaeipour M., El Baghdadi M., Barrero R., Van Mierlo J., Hegazy O., 2020. Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119(80): 109596. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109596.
- Tran M.-K., Akinsanya M., Panchal S., Fraser R., Fowler M., 2021. Design of a Hybrid Electric Vehicle Powertrain for Performance Optimization Considering Various Powertrain Components and Configurations. *Vehicles*, 3(1): 20–33. DOI: 10.3390/vehicles3010002.
- Rensselar J. van, 2019. The tribology of electric vehicles. *Tribology & Lubrication Technology*, 75(1): 34–6.
- Wen I., Xing C.Y., Yang S.C., 2010. The effect of adding dimethyl carbonate (DMC) and ethanol to unleaded gasoline on exhaust emission. *Applied Energy*, 87(1): 115–121. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.06.005.
- Zhang J., Richter J.-M., Kaczmarek C., 2020. Catalysts for Post Euro 6 Plug-In Hybrid Electric Vehicles. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, 2(6): 3151–3163. DOI: 10.4271/2020-01-0354.
- Zhuang W., Li S.E., Zhang X., Kum D., Song Z., Yin G., Ju F., 2020. A survey of powertrain configuration studies on hybrid electric vehicles. *Applied Energy*, 262: 114553. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114553.



Dr hab. inż. Zbigniew STĘPIEŃ, prof. INIG – PIB  
Kierownik Zakładu Oceny Właściwości  
Eksploatacyjnych  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [zbigniew.stepien@inig.pl](mailto:zbigniew.stepien@inig.pl)