

## Znaczenie składu benzyny w tworzeniu osadów wtryskiwaczy silników z bezpośrednim wtryskiem paliwa

### Significance of petrol composition in the formation of fuel injector deposits in direct injection engines

Zbigniew Stępień

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** W artykule poruszono problem tworzenia się szkodliwych osadów we wtryskiwaczach silników o zapłonie iskrowym z bezpośrednim wtryskiem paliwa. Silniki takie mają dużą skłonność do tworzenia osadów, w tym w szczególności osadów wtryskiwaczy paliwa. Opisano skutki powstawania osadów dla funkcjonowania układu wtrysku paliwa. Zwrócono uwagę, że osady takie znacząco pogarszają zarówno osiągi, jak i parametry użytkowo-eksploatacyjne silników. Czynniki sprzyjające tworzeniu się osadów mogą być związane z właściwościami paliwa, konstrukcją silnika, konstrukcją wtryskiwaczy oraz warunkami pracy silnika. Stanowi to wyzwanie i określa nowe obszary badawcze dla konstruktorów silników, ale także dla producentów paliw – a szczególnie dodatków uszlachetniających. Jakość mieszanki paliwowo-powietrznej tworzonej w komorach spalania silników o zapłonie iskrowym z bezpośrednim wtryskiem paliwa jest prawie całkowicie uzależniona (kontrolowana) od funkcjonowania wtryskiwaczy paliwa, na które największy wpływ mają utworzone szkodliwe osady. W artykule opisano mechanizmy formowania się osadów we wtryskiwaczach silnika z bezpośrednim wtryskiem. Następnie wskazano i rozpatrzono dotychczas ustalone najważniejsze właściwości, wynikające ze składu benzyny, mające dominujący wpływ na występowanie tych szkodliwych procesów. Zwrócono uwagę na rozbieżne wyniki badań dotyczące kilku właściwości benzyny i oceny ich wpływu na inicjowanie i tworzenie się szkodliwych osadów wtryskiwaczy. Wyjaśniono też znaczenie dodatków detergentowo-dyspergujących do paliw jako najbardziej efektywnego środka w przeciwdziałaniu procesom powstawania szkodliwych osadów silnikowych. Celem pracy było zbadanie wpływu różnych właściwości fizykochemicznych benzyny na tendencję do tworzenia się osadów wtryskiwaczy silnika z bezpośrednim wtryskiem paliwa. Badania były prowadzone według znormalizowanej, uznanej ogólnoeuropejskiej procedury CEC F-113-KC (VW EA111 BLG). W artykule krótko scharakteryzowano metodykę badawczą opisaną w tej procedurze, a następnie pięć benzyn silnikowych o różnych właściwościach fizykochemicznych, które przygotowano do badań. Benzyny te różniły się właściwościami fizykochemicznymi, które zdaniem autora projektu powinny być najistotniejsze z punktu widzenia skłonności paliwa do tworzenia osadów wtryskiwaczy paliwa. Następnie opisano i przedstawiono wyniki badań. Analiza wyników pozwoliła wskazać, które właściwości benzyn silnikowych mają największy wpływ na procesy tworzenia się osadów wtryskiwaczy paliwa. Uzyskane wyniki odniesiono i porównano z wynikami podobnych badań opisanych w dostępnej literaturze. Rezultatem realizacji pracy było między innymi potwierdzenie, że niektóre fizykochemiczne właściwości paliw mają istotny wpływ na powstawanie przedmiotowych osadów. Stwierdzono też, że o wielkości zanieczyszczenia wtryskiwaczy decyduje wypadkowa wpływu wszystkich czynników – zarówno wspomagających, jak i ograniczających proces tworzenia się osadów. Ponadto niektóre z czynników mogą wchodzić ze sobą w trudne do ustalenia interakcje.

**Słowa kluczowe:** silnik spalinowy o zapłonie iskrowym i z bezpośrednim wtryskiem paliwa, osady wtryskiwaczy paliwa, tworzenie osadów, właściwości benzyn silnikowych, ocena osadów wtryskiwaczy paliwa.

**ABSTRACT:** This paper addresses the problem of harmful deposits forming in the injectors of spark-ignition engines with direct fuel injection. Such engines are highly prone to the formation of harmful deposits including, in particular, fuel injector deposits. The effects of deposit formation on the functioning of the fuel injection system are described. It is pointed out that such deposits significantly degrade both the performance and operational properties of engines. Factors enabling deposit formation can be related to fuel properties, engine design, injector design and engine operating conditions. This poses challenges and defines new areas of research for engine designers as well as for fuel manufacturers and additive manufacturers in particular. The quality of the fuel-air mixture formed in the combustion chambers of direct injection spark-ignition engines is almost entirely dependent (controlled) on the functioning of the fuel injectors, which are most affected by the harmful deposits formed. This paper describes the mechanisms of deposit formation in direct injection engine injectors. Then, the most important properties, resulting from the composition of petrol, so far established, which have a dominant influence on the occurrence of these harmful processes, are indicated and considered. Attention was drawn to the divergent findings on several gasoline properties and the assessment of their impact on the initiation and formation of harmful injector deposits. The

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

Artykuł nadesłano do Redakcji: 16.12.2022 r. Zatwierdzono do druku: 26.01.2023 r.

importance of detergent/dispersant fuel additives as the most effective means of counteracting the formation of harmful engine deposits is also explained. The aim of this study was to investigate the influence of various physicochemical properties of petrol on the tendency of direct injection engine injectors to form deposits. The tests were conducted according to the standardised, recognised, pan-European CEC procedure F-113-KC (VW EA111 BLG). The article briefly characterises the testing methodology described in this procedure, followed by five motor gasolines with different physicochemical properties that were prepared for testing. The petrols differed in their physicochemical properties, which the project's author believes should be the most relevant in terms of the fuel's tendency to form fuel injector deposits. The results of the study are then described and presented. Analysis of the results indicated which properties of petrol have the greatest influence on fuel injector deposit formation processes. The results obtained were related and compared with the results of similar studies reported in the available literature. The work succeeded, among others, in confirming that certain, physicochemical properties of the fuels have a significant influence on the formation of the deposits in question. It was also found that the amount of pollution in the injectors is determined by the resultant effect of all factors both supporting and limiting the deposit formation process. In addition, some of the factors may interact with each other in ways that are difficult to determine.

Key words: Direct Injection Spark Ignition, injector deposits, deposit formation, petrol properties, injector deposit evaluation.

## Wstęp

Globalna polityka ograniczania zanieczyszczeń z sektora transportu drogowego wymaga wprowadzania zupełnie nowych lub znacznie zmodyfikowanych istniejących technologii i rozwiązań konstrukcyjnych. Wiąże się to z koniecznością prowadzenia badań w nowych obszarach lub rozszerzenia i pogłębienia badań w obszarach już zdefiniowanych. W przypadku motoryzacji zasadniczym kierunkiem tych przedsięwzięć jest podporządkowanie rozwoju pojazdów samochodowych i stosowanych do nich paliw lub innych źródeł energii nadrzędnemu celowi, jakim jest zmniejszenie emisji do atmosfery składników szkodliwych, w tym gazów cieplarnianych (*angreenhouse gas*, GHG). W konstrukcji silników spalinyowych z ZI (zapłon iskrowy) stosowanie technologii bezpośredniego wtrysku paliwa – GDI (*ang. gasoline direct injection*) stało się powszechne. Obecnie technologia ta stanowi najlepsze rozwiązanie w zakresie dalszego rozwoju silników w trzech podstawowych kierunkach, tj.: obniżenia wielkości zużycia paliwa, obniżenia emisji składników szkodliwych do atmosfery oraz dalszej poprawy sprawności i osiągnięć silników. Jednak w zakresie emisji składników szkodliwych silniki DISI (*ang. direct injection spark ignition*) charakteryzują się, między innymi, znacznie wyższą emisją cząstek stałych w porównaniu z silnikami ZI z pośrednim wtryskiem paliwa (około 10-krotnie wyższą), wykazują większą tendencję do spalania stukowego i mają dużą skłonność do tworzenia szkodliwych osadów, w tym w szczególności osadów wtryskiwaczy paliwa, które znacząco pogarszają zarówno ich osiągi, jak i parametry użytkowo-eksploatacyjne. Stanowi to wyzwanie i określa nowe obszary badawcze dla konstruktorów silników, ale także dla producentów paliw, a zwłaszcza dodatków uszlachetniających (Stępień i Czerwinski, 2017; Stępień, 2020; Stępień et al., 2021). W porównaniu z silnikami z pośrednim wtryskiem paliwa (*ang. port fuel injection*, PFI) wtryskiwacze paliwa silników DISI pracują w dużo bardziej szkodliwym środowisku. Umieszczone w komorze spalania

końcówki wtryskiwaczy narażone są na bezpośredni wpływ bardzo wysokiego ciśnienia i temperatury spalanego ładunku mieszanki paliwowo-powietrznej, co ma wpływ na szybkie tworzenie szkodliwych osadów koksowych, zwłaszcza na zewnątrz rozpylacza wtryskiwacza – wokół otworków wylotowych oraz w kanałkach wypływowych paliwa. Nie bez znaczenia są też chemiczne oddziaływania spalanego paliwa (Kalghatgi, 2013; Henkel et al., 2017; Bennett, 2018; Shuai et al., 2018). Stanowi to duży problem dla poprawnego funkcjonowania silnika, ponieważ jakość tworzonej w komorach spalania mieszanki paliwowo-powietrznej jest prawie całkowicie uzależniona (kontrolowana) od funkcjonowania wtryskiwaczy paliwa, na które największy wpływ mają tworzone w nich szkodliwe osady. Osady zewnętrzne wokół otworków wylotowych paliwa powstają głównie ze spalanego paliwa i w mniejszym stopniu ze smarowego oleju silnikowego (rysunek 1). Powodują one zniekształcenia strugi rozpylanego paliwa, jej wydłużenie, omywanie paliwem ścianek komory spalania i denka tłoka, a w konsekwencji – wzrost zużycia paliwa i emisji składników szkodliwych (w szczególności HC i PM). Wewnętrzne osady wtryskiwaczy pochodzą wyłącznie z paliwa. Ograniczają one natężenia przepływu wtryskiwanego do komór spalania paliwa na skutek zmniejszania przekroju kanałków wypływu paliwa we wtryskiwaczu. Ma to wpływ na zwiększenie średniej średnicy kropli rozpylanego paliwa, na ilościową proporcję zmieszania paliwa z powietrzem (współczynnik nadmiaru powietrza,  $\lambda$ ) i na wydłużenie czasu odparowania paliwa (Zhao et al., 1999; Aradi et al., 2003; Lindgren et al., 2003; Altin i Eser, 2004; Xu et al., 2015). W rezultacie prowadzi to do zmniejszenia sprawności i osiągnięć silnika oraz do wzrostu zużycia paliwa.

Mechanizmy powstawania osadów w silniku różnią się w zależności od miejsca ich tworzenia i czynników, które mają na nie wpływ. Z uwagi na równocześnie zachodzące procesy usuwania osadów wielkość powstałych osadów stanowi wynik procesów ich tworzenia i usuwania. Mechanizmy formowania osadów są znane, chociaż procesy ich powstawania nie są do tej pory w pełni zrozumiałe. W przypadku wtryskiwaczy paliwa



**Rysunek 1.** Widok osadów na końcówce wtryskiwacza silnika DISI

**Figure 1.** View of deposits on the injector tip of a DISI engine

prekursory osadów powstają na skutek utleniania, kondensacji i wytrącania niestabilnych węglowodorów (aromatów i olefin) z paliwa (Xu et al., 2015). Prekursory te formują osady poprzez dwie odrębne ścieżki reakcji chemicznych, tj. samoutlenianie w niskich temperaturach oraz tworzenie osadów koksowych na skutek pirolizy w wysokich temperaturach. Jednak do tej pory nie udało się ustalić temperatury granicznej pomiędzy reakcjami zachodzącymi w niskiej i wysokiej temperaturze, tym bardziej że zaobserwowano zakres temperatur, w którym zachodzą zarówno reakcje przypisane do niskich, jak i do wysokich temperatur (Xu et al., 2015).

Stabilność oksydacyjna różni się od stabilności termicznej i odnosi się do szybkości zużycia tlenu podczas formowania

produktów utleniania. W reakcjach utleniania rodników alkilowych powstają uwodnione nadtlenki i inne produkty utleniania odpowiedzialne za tworzenie osadów (Altin i Eser, 2004). W temperaturze wyższej niż 350°C osady węglowe są zazwyczaj tworzone w dwojaki sposób, tj. poprzez rozkład węglowodorów do wolnego węgla i wodoru oraz poprzez polimeryzację/kondensację różnych odmian węglowodorów do większych wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych, które następnie tworzą zarodki, a następnie osady węglowe.

Ogólnie czynniki sprzyjające powstawaniu osadów mogą być związane z paliwem, konstrukcją silnika, konstrukcją wtryskiwacza oraz warunkami pracy silnika. Skład paliwa ma bardzo duży wpływ na tworzenie osadów wtryskiwaczy.

Szczególną uwagę zwraca się na temperaturę odparowania 90% paliwa (T90), przy czym znane są dwie teorie dotyczące roli T90 w powstawaniu osadów. Jedna z nich zakłada, że im wyższa temperatura T90 paliwa, tym ma ono mniejszą tendencję do tworzenia osadów wtryskiwaczy. Druga zakłada, że jeżeli temperatura końcówki rozpylacza jest niższa niż T90, niektóre paliwa będą miały mniejszą tendencję do tworzenia osadów, a w przypadku gdy T90 jest wyższa niż temperatura końcówki wtryskiwacza, skłonność do tworzenia osadów będzie większa.

Wpływ zawartości siarki w benzynie na tworzenie osadów wtryskiwaczy był przedmiotem badań wielu prac (Aradi et al., 1999; Ashida et al., 2001; China i Rivere, 2003; Fernandes et al., 2013). Badania te potwierdziły jednoznacznie niekorzystny wpływ siarki zawartej w paliwie na utrzymywanie czystości wtryskiwaczy. Równocześnie – prezentowane wyniki są rozbieżne, a w wielu przypadkach sprzeczne względem siebie co do wpływu ilości zawartej w paliwie siarki na wzrost lub spadek tendencji do tworzenia osadów.

Badania wpływu zawartości olefin w paliwie na tendencję do powstawania osadów wtryskiwaczy wykazały, że wzrost zawartości olefin powoduje wzrost tworzonych osadów (Aradi et al., 1999). W innych badaniach wykazano też, że wzrost masy cząsteczkowej olefin prowadzi do większej ilości tworzonych osadów (Uehara et al., 1997). Z chemicznego punktu widzenia olefiny są wysoce reaktywnymi składnikami z powodu swych nienasyconych wiązań węglowych i małej stabilności termicznej. Dlatego też uważa się, że olefiny wspomagają tworzenie osadów zarówno poprzez niskotemperaturowe samoutlenianie, jak i wysokotemperaturową pirolizę (Uehara et al., 1997).

Ilość dostępnych w literaturze informacji dotyczących wpływu aromatów na tworzenie osadów wtryskiwaczy jest ograniczona. Wiadomo jedynie ogólnie, że zawarte w paliwie aromaty sprzyjają powstawaniu osadów wtryskiwaczy (Fernandes et al., 2013).

W osadach wtryskiwaczy wykrywane są różne pierwiastki metaliczne, jak: Zn, Fe, Ca, Mg, Na i K oraz nierozpuszczalne sole (Aradi et al., 1999; Carlisle et al., 2001; DuMont et al., 2007; Barker et al., 2009; Lacey et al., 2011; Fernandes et al., 2013). Pierwiastki metaliczne pochodzą zazwyczaj z oleju smarowego lub są wnoszone z paliwem jako zanieczyszczenia. Osady powstałe na powierzchni końcówki wtryskiwacza tworzą się w większości z paliwa, niekiedy zawierają też pierwiastki z oleju smarowego (Ca, Zn, Mg). Osady wewnętrzne wtryskiwaczy pochodzą w całości z paliwa. Identyfikowano w nich między innymi Na, K, sole siarki. Do tej pory nie są dostępne jednoznaczne wyniki badań dotyczących określenia ilościowego wpływu różnych pierwiastków metalicznych i soli na tendencję do tworzenia się i wielkość powstających osadów.

Stosowanie dodatków do paliw pozwala na poprawę właściwości fizykochemicznych oraz walorów użytkowo-

-eksploatacyjnych paliw. Dodatki można podzielić na uszlachetniające i poprawiające parametry użytkowe silnika. Dodatki uszlachetniające to te podstawowe, które aplikowane są do gotowych paliw w celu dostosowania ich do wymagań eksploatacyjnych w określonym obszarze zastosowania, a dodatki poprawiające parametry użytkowe to takie, które pozwalają poprawić osiągi, a także walory użytkowo-eksploatacyjne silnika i wyróżniają paliwa określonego producenta. Typowymi dodatkami poprawiającymi walory użytkowo-eksploatacyjne silnika są dodatki DCA (ang. *deposit control additives*), a zatem zapobiegające tworzeniu się osadów. Dodatki typu DCA są często błędnie określane jako dodatki detergentowe, ale ich funkcja jest inna niż konwencjonalnych detergentów używanych do mycia i czyszczenia. Odpowiednio skomponowane pakiety dodatków typu DCA są stosowane w celu utrzymania czystości układu dolotowego (przeciwdziałanie tworzeniu się osadów na zaworach dolotowych), układu wtrysku paliwa (przeciwdziałanie tworzeniu się wewnętrznych, jak i zewnętrznych osadów na elementach wtryskiwaczy) oraz komór spalania. DCA stanowią zazwyczaj pakiet dodatków detergentowo-dyspergujących, oleju nośnego i rozpuszczalnika (Danilov, 2015; Bennett, 2018). Jako standardowe dodatki detergentowo-dyspergujące do benzyn silnikowych stosowane są substancje typu PIBA (poliizobutylenoaminy) i PEA (polieteroaminy). Ich skuteczność jest na tyle wysoka, że chociaż należą do starszych generacji (IV generacja) dodatków detergentowo-dyspergujących, to nadal są powszechnie stosowane (Danilov, 2015). Do najnowszych generacji tego typu dodatków należą natomiast zasady Mannicha (generacja V) oraz pochodne zasad Mannicha (generacja VI) (Danilov, 2015). Dodatki generacji V i VI potrafią nie tylko zapobiegać powstawaniu osadów w komorach spalania, ale mają również zdolność usuwania istniejących osadów.

Dodatki typu DCA do benzyn silnikowych można podzielić na trzy kategorie w zależności od obszaru ich działania:

- DCA przeciwdziałające powstawaniu osadów w układzie paliwowym silnika;
- DCA przeciwdziałające powstawaniu osadów w układzie dolotowym silnika (kolektory, kanały i zawory dolotowe);
- DCA przeciwdziałające powstawaniu osadów w komorach spalania silnika.

Wyniki dotychczasowych badań wykazały, między innymi, że w przypadku silników typu DISI niektóre substancje detergentowo-dyspergujące skutecznie przeciwdziałają powstawaniu osadów wtryskiwaczy, gdy silnik pracuje w trybie tworzenia mieszanki uwarstwionej, ale nie są skuteczne podczas pracy silnika w trybie tworzenia mieszanki homogenicznej (Carlisle et al., 2001). Z kolei dodatki oparte na zasadach Mannicha skutecznie usuwają powstałe już osady wtryskiwaczy w przypadku pracy silnika w trybie tworzenia mieszanki uwarstwionej, a równocześnie zwiększają tendencję do tworzenia się osadów

wtryskiwaczy, gdy silnik pracuje w trybie tworzenia mieszanki homogenicznej (Aradi et al., 2003).

Obecnie DCA uważane są za najskuteczniejszy sposób zapobiegania powstawaniu osadów silnikowych, w tym osadów wtryskiwaczy paliwa. Przeciwdziałanie tworzeniu się osadów wtryskiwaczy nabierze jeszcze większego znaczenia, ponieważ elementy te będą jeszcze bardziej czułe na zanieczyszczenie osadami zaburzającymi ich funkcjonowanie. Zatem właściwości paliwa, a w szczególności skuteczność uszlachetniających je pakietów dodatków DCA, będą odgrywały decydującą rolę w zakresie utrzymywania przez silnik w okresie eksploatacji parametrów użytkowych i osiągnięć deklarowanych przez jego producenta.

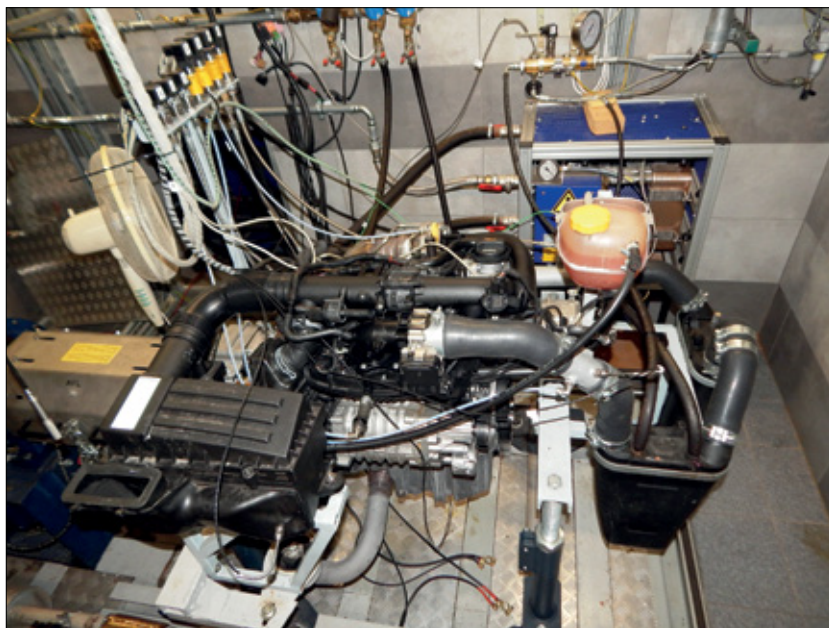
Motywacją do podjęcia opisanej w artykule pracy była ocena wpływu benzyn o różnych właściwościach fizykochemicznych na proces tworzenia się osadów wtryskiwaczy silników DISI.

### Cel badań

Celem pracy było badanie wpływu składu benzyny i jej różnych właściwości fizykochemicznych na skłonność do powstawania osadów wtryskiwaczy silnika DISI według procedury CEC F-113-KC (VW EA111 BLG).

### Metodyka badań

Obecnie w Europie jedyną obowiązującą, uznaną procedurą badawczą pozwalającą na ocenę i rozróżnianie paliw spełniających wymagania i niespełniających wymagań producentów silników i układów wtrysku paliwa w zakresie utrzymania czystości układu bezpośredniego wtrysku paliwa w czasie eksploatacji silnika DISI jest procedura CEC F-113 (*VW EA111 DISI Injector Deposit Test*) (Stępień, 2021). Procedura zakłada możliwość badania zarówno skłonności paliwa do tworzenia osadów wtryskiwaczy, tzw. *Keep Clean Test* – CEC F-113-KC, jak i ocenę paliwa w zakresie jego zdolności do wymywania wcześniej utworzonych osadów wtryskiwaczy, tzw. *Dirty Up & Clean Up Test* – procedura CEC F-113-CU. W prezentowanych w artykule badaniach wykorzystywano procedurę CEC F-113-KC – „*Keep Clean*” Test. Jako narzędzie badawcze zastosowano szeroko znany i wykorzystywany w wielu rodzajach pojazdów koncernu VW silnik typu VW EA111 BLG. Jest to silnik z bezpośrednim wtryskiem paliwa, z kombinowanym systemem doładowania (doładowanie mechaniczne



**Rysunek 2.** Widok silnikowego stanowiska badawczego zgodnego z procedurą badawczą CECF-113

**Figure 2.** View of engine test bench according to the test procedure CECF-113

+ turbodoładowanie), zbudowany w konwencji downsizingu. Silnik wyposażony jest we wtrysk paliwa kategorii *wall-guided*. Do wtryskiwania paliwa zastosowano sześciotworkowe wtryskiwacze sterowane elektromagnetycznie. Powyższa procedura jest wymagana przez *World Wide Fuel Charter* (wydanie VI z 28.10.2019 r.) do oceny paliw pod względem ich tendencji do tworzenia osadów wtryskiwaczy silników z bezpośrednim wtryskiem paliwa. Kryterium oceny paliwa w testach jest zmieniająca się szerokość impulsu elektrycznego sterującego czasem wtrysku pojedynczej dawki paliwa. Czas ten ulega zmianie (wydłużeniu) w miarę stopniowego zwiększania się ilości osadów gromadzących się na zewnątrz i wewnątrz wtryskiwacza. Na rysunku 2 przedstawiono stanowisko badawcze z silnikiem VW EA111 BLG.

### Materiały

Badaniom w testach silnikowych poddano pięć benzyn różniących się właściwościami fizykochemicznymi. Przy wyborze benzyn kierowano się potrzebą oceny wpływu ich różnych parametrów fizykochemicznych na tendencję do tworzenia osadów wtryskiwaczy silnika VW EA111 BLG. W celu lepszego rozróżnienia wpływu różnych właściwości fizykochemicznych na tendencję do tworzenia osadów do testów wykorzystano paliwa niezawierające pakietów dodatków uszlachetniających typu DCA (ang. *deposit control additives*). Właściwości fizykochemiczne przygotowanych próbek paliw do badań silnikowych przedstawiono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Właściwości fizykochemiczne próbek benzyn przygotowanych do badań silnikowych  
**Table 1.** Physical and chemical properties of gasoline samples prepared for engine tests

Właściwość	Jednostka	RF-12-09 batch 10					CAF W18-936	BB 95	BB 98	Metoda badania wg
		1	2	3	4	5				
Gęstość w temperaturze 15°C	[kg/m <sup>3</sup> ]	746,3	751,4	746,9	762,3	725,6	PN-EN ISO 12185			
Liczba oktanowa badawcza (LOB)	-	96,0	99,3	96,1	95,7	98,8	PN-EN ISO 5164			
Liczba oktanowa motorowa (LOM)	-	85,9	88,0	86,7	85,1	89,6	PN-EN ISO 5163			
Zawartość siarki	[mg/kg]	9,0	1,4	1,3	45,6	2,8	PN-EN ISO 20846			
Okres indukcyjny	[minuty]	>360	>480	>360	>360	>1200	PN-EN ISO 7536			
Zawartość żywic obecnych (po przemyciu rozpuszczalnikiem)	[mg/100ml]	0,9	0,5	0,8	3,0	1,0	PN-EN ISO 6246			
Zawartość węglowodorów typu:										
- olefinowego	[% (V/V)]	7,40	4,3	7,90	9,80	4,40	PN-EN 15553			
- aromatycznego	[% (V/V)]	32,10	33,10	31,80	40,60	20,80				
Zawartość benzenu	[% (V/V)]	0,50	0,16	<0,10	0,40	0,30	PN-EN 238:2000+A1			
Zawartość tlenu	[% (V/V)]	0,11	<0,10	4,80	<0,01	<0,01	PN-EN 1601			
Metanol	[% (V/V)]	<0,80	<0,17	<0,10	<0,17	<0,17				
Etanol	[% (V/V)]	<0,80	<0,17	4,8 ± 0,37	<0,17	<0,17				
Alkohol izopropylowy	[% (V/V)]	<0,80	<0,17	<0,10	<0,17	<0,17	PN-EN 1601			
Alkohol tert-butylowy	[% (V/V)]	<0,80	<0,17	<0,10	<0,17	<0,17				
Alkohol izobutyloowy	[% (V/V)]	<0,80	<0,17	<0,10	<0,17	<0,17				
Inne związki organiczne zawierające tlen	[% (V/V)]	<0,80	<0,17	<0,10	<0,17	<0,17				
Prężność par (DVPE)	[kPa]	60,8	59,5	57,3	54,2	57,8	PN-EN 13016-1			
Skład frakcyjny:										
- IBP	[°C]	34,8	37,2	33,3	37,4	42,1				
- temperatura końca destylacji	[°C]	205,5	196,4	200,4	214,9	185,1				
- destyluje	[% (V/V)]	97,9	97,9	97,6	97,3	97,9				
- pozostałość	[% (V/V)]	0,7	0,4	1,2	1,0	1,0	PN-EN ISO 3405			
- straty	[% (V/V)]	1,7	1,1	1,5	1,7	1,1				
- temperatura odparowania 10%, T10	[°C]	52,3	53,1	52,6	52,3	67,3				
- temperatura odparowania 50%, T50	[°C]	106,5	96,8	96,0	106,5	101,8				
- temperatura odparowania 90%, T90	[°C]	172,9	152,2	176,6	172,9	144,9				
Indeks lotności, VLI (VLI = 10DVPE + 7E70)	-	746	757	1018	746	952	PN-EN 228 + A1			

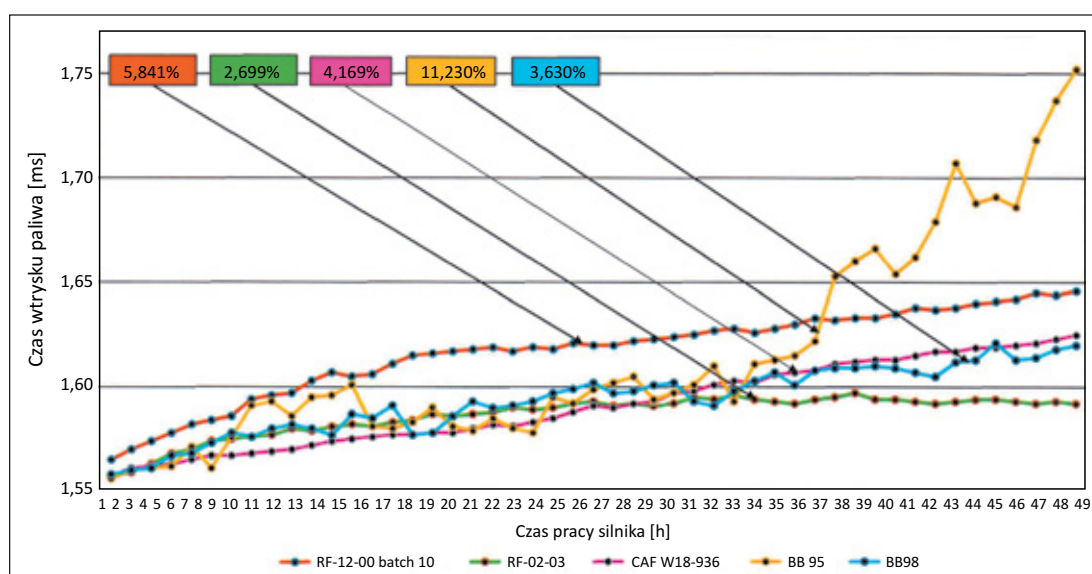
Trzy spośród badanych benzyn to paliwa wzorcowe stosowane w testach silnikowych CEC. Benzyna RF-12-09 batch 10 to paliwo o dużej tendencji do tworzenia osadów na zaworach dolotowych silników ZI, stosowane do wzorcowania silników badawczych Mercedes M102E i Mercedes M111. Benzyna RF-02-03 to paliwo o małej tendencji do tworzenia osadów na zaworach dolotowych, stosowane do wzorcowania silników badawczych Mercedes M102E i Mercedes M111. Natomiast paliwo CAF W18-936 to paliwo o małej tendencji do tworzenia osadów koksowych wtryskiwaczy silnika VW EA111 BLG. Używane jest do wzorcowania silnika badawczego VW EA111 BLG. Dwie pozostałe benzyny bazowe, bezołowiowe BB 95 i BB 98, zostały przygotowane specjalnie do badań w projekcie. Wymagania stawiane bezołowiowej benzynie silnikowej opisane są w normie PN-EN 228+A1:2017-06. Próbka benzyny BB 95, niezawierająca związków tlenowych, charakteryzowała się czterokrotnym przekroczeniem zawartości siarki w stosunku do wymagań, co świadczy o obecności nieodsiarzonych frakcji benzynowych. Przekroczony został także limit zawartości związków aromatycznych, a próbka charakteryzowała się też wysoką temperaturą końca destylacji. Odpowiedzialna jest za to prawdopodobna obecność ciężkich frakcji aromatycznych, które spowodowały również uzyskanie wysokiej gęstości próbki. Próbka cechowała się letnią prężnością par. Próbka benzyny BB 98 charakteryzowała się bardzo niską gęstością, w pobliżu dolnej granicy normy ( $720 \text{ kg/m}^3$ ), oraz niską zawartością siarki. Skład węglowodorowy próbki wskazywał na niską zawartość olefin – 4,4% (*V/V*) i dość niską zawartość związków aromatycznych – 20,8% (*V/V*). Próbka zawierała etery w ilości 10,2% (*V/V*). Wyniki te wskazują, że

około 65% (*V/V*) stanowiły związki parafinowo-naftenowe. Temperatura odparowania T10 była dość wysoka w porównaniu z innymi badanymi próbkami benzyn. Ze względu na prężność par (57,8 kPa) próbka kwalifikowała się do okresu letniego. Próbka ta charakteryzowała się także korzystnie niską temperaturą końca destylacji. Wyniki badania składu chemicznego i składu frakcyjnego próbki wskazują, że część parafinowo-naftenowa próbki mogła zawierać duże ilości frakcji alkilatu oraz izomeryzatu. Wysokie liczby oktanowe (MON i RON) zostały osiągnięte poprzez udział w składzie próbki związków aromatycznych, związków tlenowych (etery), a także wymienionych uprzednio frakcji.

### Wyniki badań

Wyniki badań wpływu benzyn o różnym składzie na procesy powstawania osadów wtryskiwaczy silnika z bezpośrednim wtryskiem paliwa przedstawiono na rysunku 3. Rysunek obejmuje zestawienie porównawcze przebiegów zmian szerokości impulsu elektrycznego sterującego czasem wtrysku dawki paliwa podczas 48 godzin prowadzenia testu silnikowego. W kolorowych polach opisano procentowe zmiany (wydłużenie) szerokości przedmiotowych impulsów dla pięciu badanych próbek benzyn silnikowych.

Ponieważ mierzony impuls jest niestabilny i zmienia się z bardzo dużą częstotliwością i stosunkowo dużą amplitudą w czasie, obliczenie przyrostu szerokości impulsu (czasu wtrysku) poprzez proste porównanie jego wielkości na początku i na końcu testu mogłoby być obarczone dużym błędem.



**Rysunek 3.** Zestawienie przebiegów zmian szerokości impulsu elektrycznego sterującego czasem wtrysku dawki paliwa dla badanych próbek benzyn silnikowych

**Figure 3.** Summary of variations in the width of the electric pulse controlling the time of injection of the fuel dose for the petrol samples tested

Dlatego też zamiast tego stosuje się metodologię opartą na wykorzystaniu funkcji trendu, ponieważ wartości obliczone na podstawie trendu są bardziej reprezentatywne niż te które oparto by na końcowych punktach pomiaru. W ten sposób uzyskuje się średnie obliczeniowe szerokości impulsu elektrycznego sterującego czasem wtrysku na początku i na końcu testu. Różnica pomiędzy nimi stanowi wynik testu, który zazwyczaj podawany jest jako procent wzrostu szerokości impulsu elektrycznego sterującego czasem pojedynczego wtrysku paliwa.

### Analiza wyników i podsumowanie

Przystępując do oceny wyników, należy zaznaczyć, że każda konstrukcja silnika i zastosowanych w nim wtryskiwaczy, a co się z tym wiąże – strategia organizacji zachodzących w nim procesów tworzenia ładunku palnego i spalania, ma bardzo duży wpływ na intensywność zjawiska zakoksowywania wtryskiwaczy. Od tego zatem zależy końcowy wynik oceny paliwa w rozumieniu progresji tworzenia osadów, jak i wielkości osadów wtryskiwaczy wytworzonych w określonym czasie. W przypadku opisanym w niniejszym artykule badania i oceny zostały wykonane, zgodnie z procedurą CEC F-113-KC, w silniku VW EA111 BLG.

Przeprowadzone dotychczas w wielu laboratoriach europejskich oceny paliw wg wyżej wymienionej procedury pozwoliły w ramach prac Grupy Roboczej CEC TDG F-113 określić powtarzalność wyników uzyskiwanych tą metodą na podstawie rozkładu tStudenta. Obliczono, że aby rozróżnić dwa wyniki w przedziale ufności z 95-proc. prawdopodobieństwem, wymagana jest ich bezwzględna różnica o wielkości 3,0% zmiany szerokości impulsu elektrycznego sterującego czasem otwarcia wtryskiwaczy paliwa w pojedynczym wtrysku paliwa. Jednak biorąc pod uwagę, że jest to w przypadku testu silnikowego duża zmiana wielkości impulsu, ustalono, że przy ocenie wyników należy posługiwać się mniejszym przedziałem ufności (90%), dla którego wymagana jest bezwzględna różnica pomiędzy wynikami zmiany szerokości impulsu elektrycznego sterującego czasem otwarcia wtryskiwaczy paliwa w pojedynczym wtrysku paliwa wynosząca 1,8%. Pozwala to na wystarczające rozróżnienie i porównanie wyników badanych paliw.

Spośród badanych paliw największy wzrost uśrednionej szerokości impulsu elektrycznego sterującego czasem otwarcia wtryskiwaczy paliwa w pojedynczym wtrysku paliwa uzyskano w przypadku paliwa BB 95 (11,23%) – rysunek 3. Analizując skład tego paliwa (tabela 1), jako czynniki sprzyjające powstawaniu dużej ilości osadów wtryskiwaczy należy wskazać: bardzo wysoką (najwyższą w badanych benzynach) zawartość siarki oraz węglowodorów olefinowych i aromatycznych.

To spostrzeżenie jest zgodne z wynikami badań przedstawionymi w literaturze (Uehara et al., 1997; Aradi et al., 1999; Ashida et al., 2001; China i Rivere, 2003; Fernandes et al., 2013). Duże znaczenie miała też wyższa niż w przypadku pozostałych benzyn gęstość paliwa. Jest to zgodne między innymi z obserwacjami Pilbeama i Weissenbergera (2018). Przyrost osadów wtryskiwaczy mógł być też wspomagany przez dość wysoką temperaturę T90 (tabela 1). O dużym znaczeniu T90 dla tworzenia się osadów wtryskiwaczy silników DISI można znaleźć wiele informacji w literaturze, jednak informacje te często są rozbieżne. W niektórych publikacjach stwierdzono, że wysoki poziom T90 może zwiększać zanieczyszczenie wtryskiwaczy z powodu mniejszej lotności paliwa, pozwalającej na tworzenie się osadów w kanalikach wylotowych i wokół otworków wtryskiwaczy (wolniejsze ulatnianie się, prowadzące do wydłużenia czasu pozostawania paliwa na gorących powierzchniach końcówki wtryskiwacza, a w konsekwencji do szybszego utleniania i ostatecznie karbonizacji) (Kinoshita et al., 1999; Von Bacho et al., 2009; Arondel et al., 2015). W innych publikacjach dowodzi się, że niska T90 jest odpowiedzialna za zanieczyszczenie wtryskiwaczy z powodu większej lotności paliwa (krótszy czas pozostawania paliwa na powierzchni wtryskiwacza, który ogranicza intensywność jego oczyszczenia, a ponadto większa lotność powoduje, że składniki o większej masie cząsteczkowej podlegają utlenieniu i koksowaniu na gorącej powierzchni końcówki wtryskiwacza) (Fernandes et al., 2013; Badawy et al., 2018). W przypadku paliwa RF-12-09 batch 10 (rysunek 3) jego duża skłonność do tworzenia osadów wtryskiwaczy (wzrost szerokości impulsu elektrycznego sterującego czasem wtrysku wyniósł 5,841%) może wynikać z dość wysokiego poziomu zawartej w paliwie siarki w połączeniu z dużą ilością węglowodorów aromatycznych i wysoką prężnością par (DVPE) (Pilbeam i Weissenberger, 2018) – tabela 1. Podobny z punktu widzenia oceny statystycznej wynik tendencji do zanieczyszczania wtryskiwaczy paliwa uzyskano w przypadku paliwa CAF W18-936 (wzrost szerokości impulsu elektrycznego sterującego czasem wtrysku wyniósł 4,169%) – rysunek 3. Jako że jest to paliwo wzorcowe przeznaczone do regulacji i kontroli silnika VW EA111 BLG, ten wynik potwierdził dobre, zgodne z wymaganiami procedury badawczej CEC F-113-KC przygotowanie silnika do badań. Zgodnie bowiem z wymaganiami tej procedury wynik dla tego paliwa powinien zawierać się w granicach  $5\% \pm 2\%$ . W przypadku tego paliwa na uwagę zasługuje wysoka temperatura T90 oraz wysoki poziom zawartości węglowodorów olefinowych jako czynniki, które mogły mieć wpływ na dość dużą skłonność benzyny do tworzenia osadów wtryskiwaczy (rysunek 3). Paliwami, które w przeprowadzonych badaniach wykazały najmniejszy przyrost szerokości impulsu elektrycznego sterującego czasem wtrysku paliwa, były BB 98 (3,63%) i RF-02-03



(2,699%) – rysunek 3. W przypadku tych dwóch paliw uwagę zwraca niska temperatura T90 oraz niska zawartość węglowodorów olefinowych (tabela 1). Właściwością, która mogła przyczynić się do zróżnicowania wyników tych paliw, mogła być niższa wartość IBP w przypadku benzyny RF-02-03, co według np. Pilbeama i Weissenbergera (2018) przyczynia się do ograniczenia ilości tworzonych osadów wtryskiwaczy. Generalnie rzecz biorąc, dużą trudność w interpretacji uzyskanych wyników stanowi zazwyczaj istotne zróżnicowanie co najmniej kilku właściwości ocenianych paliw. Uzyskany wynik badania jest wypadkową oddziaływań różnych właściwości paliwa, z których niektóre mogą wchodzić ze sobą w bardzo trudne do ustalenia interakcje, o różnym wpływie na tworzenie osadów wtryskiwaczy.

### Wnioski

1. Silniki ZI z bezpośrednim wtryskiem paliwa (DISI) mają dużą skłonność do tworzenia szkodliwych osadów, w tym w szczególności osadów wtryskiwaczy paliwa. Osady takie znacząco pogarszają zarówno osiągi, jak i parametry użytkowo-eksploatacyjne silników. Stanowi to wyzwanie i określa nowe obszary badawcze dla konstruktorów silników, ale także dla producentów paliw, a szczególnie dodatków uszlachetniających.
2. Czynniki sprzyjające tworzeniu osadów mogą być związane z właściwościami paliwa, konstrukcją silnika, konstrukcją wtryskiwacza oraz warunkami pracy silnika.
3. W dostępnej literaturze znajduje się wiele sprzecznych informacji i opisów wyników badań dotyczących wpływu różnych właściwości paliw na zainicjowanie i szybkość tworzenia się osadów wtryskiwaczy paliwa silników ZI z bezpośrednim wtryskiem paliwa.
4. Wszystkie uzyskane w ramach przeprowadzonych w projekcie badań paliw przebiegi zmian czasu wtrysku paliwa charakteryzują się stopniowym, często bardzo niestabilnym przyrostem w czasie. Świadczy to o stopniowym narastaniu zanieczyszczeń wtryskiwaczy w czasie, okresowo zaburzonym przez równocześnie przebiegające procesy oczyszczania.
5. O wielkości zanieczyszczenia wtryskiwaczy decyduje wypadkowa wpływu wszystkich czynników – zarówno wspomagających, jak i ograniczających proces tworzenia się osadów. Ponadto niektóre z czynników mogą wchodzić ze sobą w trudne do ustalenia interakcje.
6. Wyniki przeprowadzonych w projekcie badań według procedury badawczej CEC F-113-KC wskazują na T90, węglowodory aromatyczne i olefinowe, siarkę, etanol, DVPE, IBP i gęstość paliwa jako najistotniejsze czynniki

powodujące wzrost tendencji do tworzenia osadów wtryskiwaczy silników ZI z bezpośrednim wtryskiem paliwa.

7. Dotychczasowe wyniki badań wpływu różnych właściwości paliw na tendencję do tworzenia osadów wtryskiwaczy silników ZI z bezpośrednim wtryskiem paliwa są niejednoznaczne, a czasami kontrowersyjne i dlatego wymagają rozstrzygnięcia w dalszych pracach badawczych. Ma to duże znaczenie dla opracowywania składu i optymalizacji dozowania dodatków typu DCA do paliw o określonym składzie, przeznaczonych do silników ZI typu DISI.

### Literatura

- Altin O., Eser S., 2004. Carbon Deposit Formation From Thermal Stressing of Petroleum Fuels. *Prepr. Pap.-Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem.*, 49(2): 764–766.
- Aradi A.A., Evans J., Miller K., Hotchkiss A., 2003. Direct Injection Gasoline (DIG) Injector Deposit Control with Additives. *SAE Technical Paper 2003-01-2024*. DOI: 10.4271/2003-01-2024.
- Aradi A.A., Imoehl B., Avery N.L., Wells P.P., Grosser R.W., 1999. The Effect of Fuel Composition and Engine Operating Parameters on Injector Deposits in a High-Pressure Direct Injection Gasoline (DIG) Research Engine. *SAE Technical Paper Series 1999-01-3690*. DOI: 10.4271/1999-01-3690.
- Aronel M., China P., Gueit J., 2015. Evaluating Injector Fouling in Direct Injection Spark Ignition Engines – A New Engine Test Procedure to Evaluate the Deposit Control Performance of Base Fuels and Additivated Fuels. *TAE Esslingen Fuels Colloquium*.
- Ashida T., Takei Y., Hosi H., 2001. Effects of Fuel Properties on SIDI Fuel Injector Deposit. *SAE Technical Paper 2001-01-3694*. DOI: 10.4271/2001-01-3694.
- Badawy T., Attar M.A., Xu H., Ghafourian A., 2018. Assessment of gasoline direct injector fouling effects on fuel injection, engine performance and emission. *Applied Energy*, 220(2): 351–374. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.032.
- Barker J., Richards P., Snape C., Meredith W., 2009. A Novel Technique for Investigating the Nature and Origins of Deposits Formed in High Pressure Fuel Injection Equipment. *SAE Journal of Fuels and Lubricants*, 2(2): 38–44. DOI: 10.4271/2009-01-2637.
- Bennett J., 2018. Additives for Spark Ignition and Compression Ignition engine fuels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 232(1): 148–158. DOI: 10.1177/0954407017732265.
- Carlisle H.W., Frew R.W., Mills J.R., Aradi A.A., Avery N.L., 2001. The Effect of Fuel Composition and Additive Content on Injector Deposits and Performance of an Air-Assisted Direct Injection Spark Ignition (DISI) Research Engine. *SAE Technical Paper 2001-01-2030*. DOI: 10.4271/2001-01-2030.
- China P., Rivere J.-P., 2003. Development of a direct injection spark ignition engine test for injector fouling. *SAE Technical Paper 2003-01-2006*. DOI: 10.4271/2003-01-2006.
- Danilov A.M., 2015. Progress in research on fuel additives (review). *Petroleum Chemistry*, 55: 169–179. DOI: 10.1134/S0965544115-030020.
- DuMont R.J., Cunningham L.J., Oliver M.K., Studzinski M.K., Galante-Fox J.M., 2007. Controlling Induction System Deposits in Flexible Fuel Vehicles Operating on E85. *SAE Technical Paper 2007-01-4071*. DOI: 10.4271/2007-01-4071.
- Fernandes H., Braga L.C., Martins A.R., Braga S.L., Braga C.V.M., 2013. Fuel Sulfate Content Influence in the Formation of

- Inorganics Components Deposits in the Engine Injectors with Technologies of Gasoline Direct Injection. *SAE Technical Paper* 2012-36-0314. DOI: 10.4271/2012-36-0314.
- Henkel S., Hardalupas Y., Taylor A., Confer Ch., Cracknell R., Goh T.K., Reinicke P.-B., Sens M., Rieß M., 2017. Injector Fouling and Its Impact on Engine Emissions and Spray Characteristics in Gasoline Direct Injection Engines. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 10(2): 287–295. DOI: 10.4271/2017-01-0808.
- Kalghatgi G., 2013. Deposits in Engines and Fuel Additives. [W:] Kalghatgi G. Fuel/Engine Interactions. *Published by SAE International*. ISBN: 978-0-7680-6458-2.
- Kinoshita M., Saito A., Matsushita S., Shibata H., Niwa Y., 1999. A Method for Suppressing Formation of Deposits on Fuel Injector for Direct Injection Gasoline Engine. *SAE Technical Paper* 1999-01-3656. DOI: 10.4271/1999-01-3656.
- Lacey P., Gail S., Kientz J.M., Milovanovic N., Gris Ch., 2011. Internal Fuel Injector Deposits. 2011. *SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting*, 5(1): 132–45. DOI: 10.4271/2011-01-1925.
- Lindgren R., Skogsberg M., Sandquist H., Denbratt I., 2003. The Influence of Injector Deposits on Mixture Formation in a DISC SI Engine. *SAE Technical Paper* 2003-01-10. DOI: 10.4271/2003-01-1771.
- Pilbeam J., Weissenberger D., 2018. Characterisation of Gasoline Fuels in a DISI Engine. <<https://www.aftonchemical.com/Afton/media/Documents/Articles/Characterisation-of-Gasoline-Fuels-in-a-DISI-Engine.pdf>> (dostęp: 7.12.2022).
- Shuai S., Ma X., Li Y., Qi Y., 2018. Recent Progress in Automotive gasoline Direct Injection Engine Technology. *Automotive Innovation*, 1: 95–113. DOI: 10.1007/s42154-018-0020-1.
- 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. Evolution of methods applied for assessing harmful engine deposits caused by gasoline combustion. *Nafta-Gaz*, 77(5): 340–347. DOI: 10.18668/NG.2021.05.07.
- Stępień Z., Czerwinski J., 2017. Cold Start with Ethanol-Blend Fuels and Influences on Non-Legislated Emissions of a GDI Flex Fuel Vehicle. *Polish Journal of Environmental Studies*, 26(5): 2223–2229. DOI: 10.15244/pjoes/69282.
- Stępień Z., Żak G., Markowski J., Wojtasik M., 2021. Investigation into the impact of the composition of ethanol fuel deposit control additives on their effectiveness. *Energies*, 14(3): 604. DOI: 10.3390/en14030604.
- Uehara T., Takei Y., Hosi H., Shiratani K., Okada M., Esaki Y., 1997. Study on Combustion Chamber Deposit Formation Mechanism – Influence of Fuel Components and Gasoline Detergents. *SAE Technical Paper* 971722. DOI: 10.4271/971722.
- Von Bacho P., Sofianek J.K., Galante-Fox J.M., McMahon Ch.J., 2009. Engine Test for Accelerated Fuel Deposit Formation on Injectors used in Gasoline Direct Injection Engines. *SAE Technical Paper* 2009-01-1495. DOI: 10.4271/2009-01-1495.
- Xu H., Wang C., Ma X., Sarangi A.K., Weall A., Krueger-Venus J., 2015. Fuel injector deposits in direct-injection spark-ignition engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 50: 63–80. DOI: 10.1016/j.pecc.2015.02.002.
- Zhao F., Lai M.-C., Harrington D.L., 1999. Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, (25): 437–562. DOI: 10.1016/S0360-1285(99)00004-0.

#### Akty prawne i dokumenty normatywne

PN-EN 228+A1:2017-06 - Paliwa do pojazdów samochodowych -- Benzyna bezołowiowa -- Wymagania i metody badań.



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)