

POSTĘP W ROZWOJU KONSTRUKCJI SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM WYZNACZNIKIEM JAKOŚCI PALIW CIEKŁYCH

Streszczenie

W pracy zamieszczono informacje dotyczące rozwoju konstrukcji silników o ZS oraz wpływu przy udziale właściwości fizykochemicznych niskosiarkowych olejów napędowych i biopaliw. Przedstawiono również przyszłościową strategię nowoczesnych paliw ciekłych będących mieszaninami paliw odnawialnych zwłaszcza drugiej generacji pochodzące z hydorrafinacji olejów roślinnych i tłuszczy zwierzęcych (HVO) oraz paliw ciekłych produkowanych z biomasy (BTL poprzez gazyfikację biomasy i bioodpadów do gazu syntezowego jak również syntezę węglowodorów metodą Fischera-Tropscha.

WSTĘP

Perspektywy rozwoju transportu samochodowego wskazują, że tłokowy silnik spalinowy będzie w dalszym ciągu powszechnie stosowanym źródłem napędu pojazdów mechanicznych.

Rozwój silników spalinowych przeznaczonych do napędu pojazdów drogowych jest uwarunkowany dwoma czynnikami:

- ograniczonymi zasobami paliw płynnych, zmuszającymi do poszukiwania bardziej ekonomicznych (zużywających mniej energii na wyprodukowanie jednostki masy), jednostek napędowych;
- względami ochrony środowiska naturalnego, które zmuszają do doskonalenia sposobów spalania w celu najmniejszego zanieczyszczenia otoczenia produktami spalania.

Zdecydowanie ostrzejsze unormowania dotyczące emisji spalin i hałasu, jak również ograniczenie zużycia paliwa stanowią nowe wyzwania dla konstruktorów jednostek napędowych.

Prowadzone ustawicznie prace badawcze mają na celu doskonalenie konstrukcji w aspekcie wzrostu niezawodności i sprawności, ale także proekologiczności, ukierunkowane szczególnie na ograniczenie emisji szkodliwych zanieczyszczeń NOx i PM oraz hałasu. [1]

1. POSTĘP W ROZWOJU KONSTRUKCJI SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

Wspólną cechą współczesnych silników samochodowych jest ich rosnąca złożoność, a co za tym idzie wzrastające wymagania dotyczące utrzymania czystości elementów układu paliwowego i komór spalania silnika.

Procesu wtrysku paliwa w silnikach o ZS, tworzenia mieszaniny paliwa i powietrza, jej zapłon oraz spalanie są złożonymi, powtarzającymi się okresowo szybkozmiennymi procesami zależnymi od wielu parametrów fizykochemicznych paliwa zachodzącymi w komorze spalania.

Optymalny przebieg procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym (ZS) według Hiroyasu i Arai zależy od wielu istotnych czynników, z których najważniejsze to: [2]

- konstrukcja układu dolotowego i komory spalania silnika, układu wtryskowego i rodzaj wtryskiwacza, recyrkulacja spalin i charakterystyka doładowania;
- charakterystyka wtrysku i rozpylenia w tym ciśnieniu wtrysku, czas wtrysku, szybkość wtrysku, zasięg strugi paliwa, kąt wierz-

chołkowy strugi, rozkład średniej średnicy kropeł Sautera, kawitacja;

- właściwości fizykochemiczne paliwa czyli lepkość, gęstość, skład frakcyjny, liczba cetanowa, smarność i wiele innych istotnych parametrów mających wpływ na proces wtrysku, tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej oraz proces spalania.

Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie proces spalania oleju napędowego obejmujący proces wtrysku paliwa, tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej, samozapłonu i spalania w silniku o zapłonie samoczynnym [2].

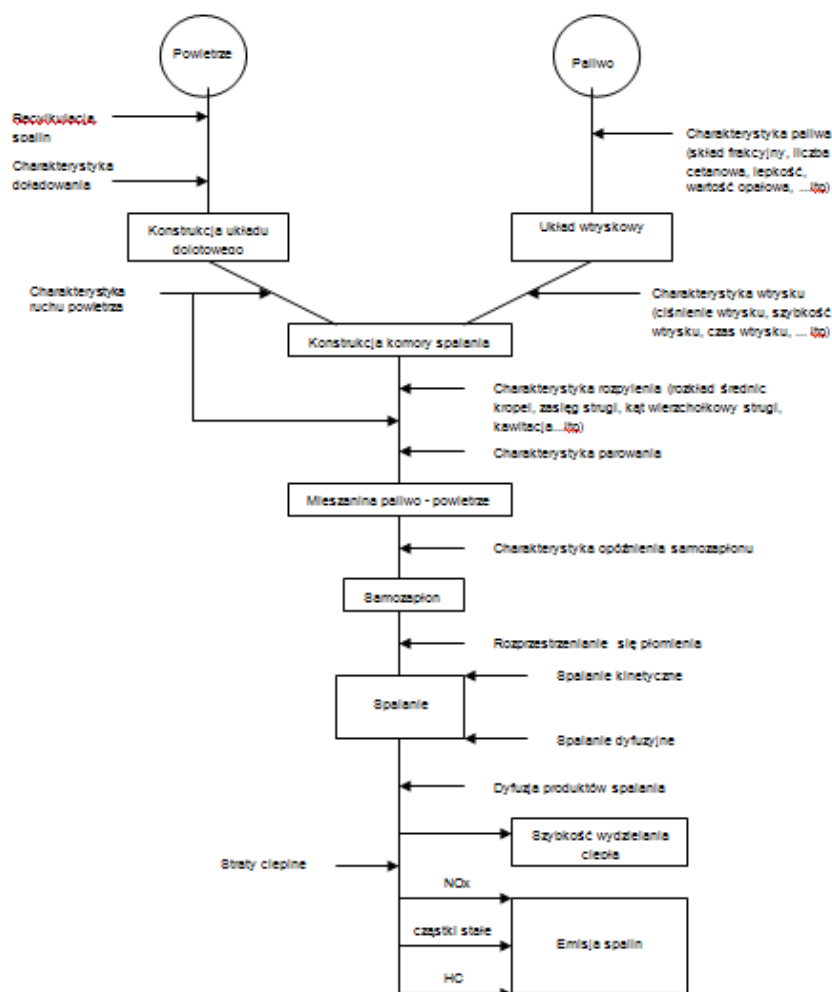
Wprowadzenie bezpośredniego, centralnego wtrysku do komory spalania ukształtowanej w denku tłoka, pozwala na zastosowanie wtryskiwaczy wielootworowych (typu Common Rail lub pompowtryskiwaczy) dzięki którym lepiej rozprowadzane jest paliwo we wnętrzu komory spalania.

Przebieg spalania zmodyfikowano przez wprowadzenie piezoelektrycznych wtryskiwaczy zmieniając średnicę otworków rozpylaczy (z średnicy 0,123 mm na 0,117 mm) i zmniejszenie ich długości do 0,85 mm przy jednoczesnym zwiększeniu ciśnienia wtrysku paliwa w całym zakresie pracy silnika. W ten sposób uzyskano lepsze rozpylenie paliwa oraz zwiększono zasięg strugi i zmniejszono możliwość koksowania paliwa na powierzchni rozpylacza.

2. PRZYSZŁOŚCIOWA STRATEGIA PALIW CIEKŁYCH PRZEZNACZONYCH DO ZASILANIA SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM.

Rosnące zapotrzebowanie gospodarki na paliwo i energię wynikające z rozwoju gospodarczego wobec zmniejszających się zasobów paliw kopalnych, wymusza kierunek wspierania rozwoju i wykorzystania biokomponentów i biopaliw ciekłych.

Przyszłościową strategią rozwoju paliw ciekłych będących mieszaninami paliw odnawialnych otrzymanych z różnorodnych surowców przedstawiono na rys. 2.



Rys. 1. Schemat procesu spalania oleju napędowego na podstawie [2]



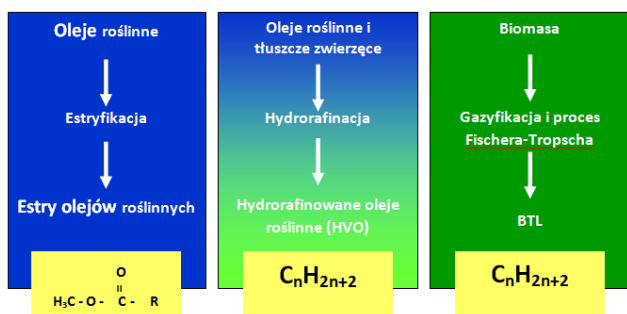
Rys.2. Przyszłościowa strategia paliw ciekłych

W perspektywie do roku 2020 przewiduje się dalszy wzrost udziału biopaliw i biokomponentów w paliwach przeznaczonych dla potrzeb transportu, przy czym będą to nie tylko paliwa pierwszej generacji pochodzące z transestryfikacji olejów roślinnych „Vegetables Oil Esters” (VOE) jak obecnie powszechnie stosowane estry metylowe kwasów tłuszczowych „Fatty acid methyl esters” (FAME) lecz paliwa drugiej generacji pochodzące z hydrotorafinacji olejów roślinnych i tłuszczów zwierzęcych (HVO), których technologia produkcji jest dostępna od paru lat na rynku firmy NESTE OIL (NEX

BTL) i paliwa ciekłe produkowane z biomasy (BTL) poprzez gazyfikację biomasy i bioodpadów do gazu syntezowego i syntezę węglowodorów metodą Fischera – Tropscha. [3, 4, 5]

Zarówno hydrotorafinacja olejów roślinnych i tłuszczów zwierzęcych jak i zgazowanie biomasy połączone z procesem Fischera – Tropscha pozwala produkować wysokiej jakości parafinowy olej napędowy o zawartości parafin 98,5 do 99 % (m/m) pozbawiony całkowicie siarki, azotu, tlenu, olefin, aromatów i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych będących prekursorami czą-

stek stałych powstających w czasie spalania mieszanki paliwo – powietrznej. Rysunek 3 pokazuje alternatywne drogi produkcji odnawialnych paliw z biomasy i ich końcowe produkty.



Rys. 3. Alternatywne drogi produkcji z biomasy odnawialnych paliw i ich końcowe produkty

W nowoczesnych silnikach o zapłonie samoczynnym wyposażonych w układ wtryskowy Common Rail, olej napędowy zanim trafi do komory spalania ulega wielokrotnej recyrkulacji pomiędzy wtryskiwaczami a zbiornikiem paliwowym.

Krążące paliwo w układzie paliwowym w zależności od wielkości zbiornika paliwowego i warunków pracy silnika może być narażone przez kilka godzin na wysokie ciśnienie i temperaturę powyżej 200°C [6]

Warunki pracy silnika o ZS oraz konstrukcja nowoczesnych układów wtrysku paliwa HPCR (wysoka temperatura, wysokie ciśnienie, małe średnice otworków rozpylaczy paliwa) wymuszają stosowanie paliw o dużej odporności termicznej i oksydacyjnej, obniżonej zawartości zanieczyszczeń stałych, śladowej zawartości metali, odporności na skażenie mikrobiologiczne oraz przede wszystkim skutecznych dodatków detergentowo – dyspergujących zapobiegających tworzeniu się osadów IDID (Internal Diesel Injector Deposits) i koksowania rozpylaczy.

Aby zapewnić czystość i sprawność układów wtryskowych HPCR, olej napędowy powinien spełniać nie tylko minimalne wymogi dotyczące jego jakości według normy PN-EN 590:2013-12 lecz również wytyczne producentów układów wtryskowych przedstawione w postaci deklaracji wspólnego stanowiska z 2012 roku odnośnie wymagań jakościowych oleju napędowego „Fuel Requirements for Diesel Injection System – Diesel Fuel Injection Equipment Manufacturers – Common Position Statement 2012” oraz wytyczne Światowej Karty Paliw dla oleju napędowego kategorii 4 – wydanie piąte z września 2013 r. przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Światowa Karta Paliw i winieta wytycznych producentów układów wtryskowych

Światowa Karta Paliw (WWFC 2013) dopuszcza w olejach napędowych 1, 2, 3 i 4 kategorii 5% (V/V) FAME pod warunkiem, że estry metylowe kwasów tłuszczowych spełniają wymagania określone w normach EN 14214, ASTM D 6751 lub innych równoważnych. Większy udział FAME (powyżej 5% (V/V) w oleju napędowym

o ultraniskiej zawartości siarki (ULSD) czyli poniżej 10 mg/kg według WWFC 2013, stwarza wiele problemów technicznych w użytkowaniu takich paliw. Wynika to ze specyficznych właściwości FAME zwanego również biodieslem, a w szczególności:

- wykazują niższą stabilność termooksydacyjną niż konwencjonalny olej napędowy co prowadzi do szybszego utleniania mieszaniny olej napędowy / FAME i pojawienia się produktów utleniania niebezpiecznych do prawidłowego funkcjonowania układu wtryskowego silnika;
- posiada gorsze właściwości płynności niskotemperaturowej powodujące wzrost lepkości i blokadę filtrów paliwowych. W celu złagodzenia tych problemów zaleca się stosowanie niskotemperaturowych modyfikatorów lepkości;
- wysoka higroskopijność biodiesla powoduje skłonność oleju napędowego do emulgowania, zawodnienia oleju napędowego w czasie magazynowania, co sprzyja skażeniu mikrobiologicznemu i korozji;
- wykazuje podwyższoną skłonność do koksowania końcówek rozpylaczy i powstawania wewnętrznych osadów we wtryskiwaczach, co wymaga stosowania odpowiednich dodatków detergentowych;
- negatywnie wpływa na uszczelnienia z kauczuku nitylowego oraz stopy metali zawierające miedź, ołów, cynk, które w kontakcie z olejem napędowym przyspieszają utlenianie i tworzenie osadów blokujących filtry paliwowe i generujących zanieczyszczenia granulometryczne niebezpieczne dla zaawansowanych technologicznie wtryskiwaczy;
- wysoka zawartość FAME w oleju napędowym zwiększa poziom emisji NOx w spalinach;
- wykazuje skłonność do rozpuszczania powłok lakierniczych stosowanych do ochrony powierzchni zewnętrznych pojazdów.

Europejscy producenci paliw i samochodów osiągnęli porozumienie pozwalające na stosowanie oleju napędowego z zawartością maksymalnie 7 % (V/V) FAME. Charakterystyka wymaganych parametrów oraz ich dopuszczalnych wartości i metod badań dla tego paliwa została przyjęta przez CEN 28 grudnia 2009 roku i wydana w postaci normy europejskiej EN 590:2009+A1:2010 „Automotive fuels-Diesel-Requirements and test methods”. Ze względów technicznych limit 7 % (V/V) FAME w oleju napędowym został utrzymany w nowym wydaniu normy europejskiej EN 590:2013 „Automotive fuels-Diesel-Requirements and test methods”. Natomiast nie dotyczy on innych biokomponentów takich jak hydrotorafinowane oleje roślinne i tłuszcze zwierzęce (HVO) i ciekłe produkty pochodzące z biomasy (BTL) oraz gazu (GTL) otrzymane w procesie Fischera – Tropscha pod warunkiem, że ostatecznie paliwo spełnia wymagania normy EN 590:2013 i ASTM D 975:2014 „Standard Specification for Diesel Fuel Oils”.

Równocześnie Europejski Komitet Normalizacyjny (CEN) opracował projekt Europejskiej Normy pr EN 15940 „Automotive fuels – Paraffinic diesel from synthesis or hydrotreatment – Requirements and test methods” obejmujący wymagania i metody badań dla tych paliw wprowadzając dwie klasy parafinowego oleju napędowego. [7]

Klasa A parafinowego oleju napędowego o minimalnej liczbie cetanowej 70,0 i Klasa B parafinowego oleju napędowego o minimalnej liczbie cetanowej 51,0. Wymagania i metody badań dla parafinowego oleju napędowego Klasy A i B przedstawiono w tabeli 1. [7]

Tab. 1. Wymagania i metody badań parafinowych olejów napędowych

Oznaczana cecha	Jednostka	Wartości dla Klasy A		Wartości dla Klasy B		Metoda badań
		minimalna	maksymalna	minimalna	maksymalna	
Liczba cetanowa		70,0	-	51,0	-	EN ISO 5165 EN 15195
Gęstość w temperaturze 15°C	kg/m ³	765,0	800,0	780,0	810,0	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Temperatura zapłonu	°C	> 55	-	> 55	-	EN ISO 2719
Lepkość kinematyczna w 40°C	mm ² /s	2,00	4,50	2,00	4,50	EN ISO 3104
Skład frakcyjny do 250°C destyluje	% (V/V)		< 65		< 65	EN ISO 3405 EN ISO 3924
do 350°C destyluje	% (V/V)	85		85		
95 % (V/V) destyluje do temperatury	°C	-	360	-	360	
Smarność (HFRR skorygowana średnica śladu zużycia w temperaturze 60°C)	µm	-	460	-	460	EN ISO 12156-1
Zawartość FAME	% (V/V)	-	7,0	-	7,0	EN 14078
Zawartość węglowodorów aromatycznych	% (m/m)	-	1,0	-	1,0	EN 12916 SIS 155116
Zawartość siarki	mg/kg	-	5,0	-	5,0	EN ISO 20846 EN ISO 20884
Pozostałość po koksowaniu (w 10% pozostałości destylacji)	% (m/m)	-	0,30	-	0,30	EN ISO 10370
Pozostałość po spopieleniu	% (m/m)	-	0,01	-	0,01	EN ISO 6245
Zawartość wody	mg/kg	-	200	-	200	EN ISO 12937
Całkowita zawartość zanieczyszczeń	mg/kg	-	24	-	24	EN 12662
Badanie działania korodującego na miedzi (3h w temperaturze 50 °C)	ocena	klasa 1		klasa 1		EN ISO 2160
Odporność na utlenianie	g/m ³	-	25	-	25	EN ISO 12205
Odporność na utlenianie	h	20*	-	20*	-	EN 15751

* W przypadku gdy parafinowy olej napędowy zawiera powyżej 2 % (V/V) okresu indukcyjnego powinien wynosić co najmniej 48 godzin

Wszystkie wartości podane w tabeli 1 spełniają wymogi Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/30/WE z dnia 23.04.2009, zmieniającej dyrektywę 98/70/WE odnoszącą się do specyfikacji benzyny i olejów napędowych oraz wprowadzającą mechanizm monitorowania i ograniczania emisji gazów cieplarnianych oraz zmieniającą dyrektywę Rady 1999/32/WE odnoszącą się do specyfikacji paliw wykorzystywanych przez statki żeglugi śródlądowej oraz uchylającą dyrektywę 93/12/EWG [8] oraz Dyrektywy Parlamentu Europejskiego 2013/17/WE i Rady z dnia 3 marca 2003 roku zmieniającą dyrektywę 98/70/WE odnoszącą się do jakości benzyny i olejów napędowych. [9]

PODSUMOWANIE

Prowadzone w ostatnich dwóch dekadach prace rozwojowe spowodowały, że parametry techniczne silników o zapłonie samoczynnym (ZS) zbliżyły się pod względem osiągnięć do silników o zapłonie iskrowym (ZI), przy wciąż znacznie mniejszym zużyciu paliwa.

Jednym z czynników sprzyjających rozwojowi silników o ZS było opanowanie problemów związanych z realizacją wysokociśnieniowego wtrysku, a także upowszechnienie turbodoładowania z jednoczesnym chłodzeniem powietrza doładowującego. Uzyskano dzięki temu zmniejszenie zużycia paliwa i ograniczenie emisji związków toksycznych, zwłaszcza w nowoczesnych jednostkach napędowych z wtryskiem bezpośrednim z aspektem doładowania. Obecnie do najważniejszych czynników stymulujących rozwój jednostek napędowych w pojazdach samochodowych i paliw silnikowych należą aspekty ekologiczne i ocena zanieczyszczenia elementów układu paliwowego i komór spalania silnika [10].

W odniesieniu do paliw płynnych wciąż dominującym źródłem ich pozyskania jest ropa naftowa. Na obecnym etapie rozwoju techniki dużą szansę częściowego uniezależnienia się od dostaw ropy naftowej i ograniczenia emisji gazów cieplarnianych upatruje się w paliwach zastępczych, w tym w biopaliwach oraz paliwach syntetycznych.

BIBLIOGRAFIA

1. Stanik W., Jakóbiec J.: Proekologiczny rozwój technologii silników o zapłonie samoczynnym. *Autobusy-Technika-Eksploatacja-Systemy transportowe*, Nr. 7-8, str. 191-196
2. Hiroyasu, H., Arai, M.: Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines. SAE Paper 900475
3. Kuronen, M., Mikkonen, S. et al. "Hydrotreated Vegetable Oil as Fuel for Heavy Duty Diesel Engines," SAE Paper 2007-01-4031, 2007
4. Soo-Young No, „Application of hydrotreated vegetable oil from triglyceride based biomass to CI engines – A review”, *Fuel* 115: 88-96, 2014
5. Kim D., Kim S. et al. „Engine performance and emission characteristics of hydrotreated vegetable oil in light duty diesel engines”, *Fuel* 125: 36-43, 2014
6. Jorg Ulmann, Marion Geduldig, „Effects of Fuel Impurities and Additive Interactions on the Formation of Internal Diesel Injector Deposits”, TAE 7th International Colloquium Fuels, Esslingen, 2009
7. pr EN 15940, „Automotive fuels – Paraffinic diesel from synthesis or hydrotreatment – Requirements and test methods”, september 2014

8. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/30/WE z dnia 23.04.2009 r.
9. Dyrektywa 2003/17/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 03.03.2003 r.
10. Stanik W.: "Badania poliizobutylenobursztynoimidów w zakresie oceny użytkowej dodatków detergentowo-dyspergujących do paliw silnikowych", Praca doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza; Kraków 2014

THE PROGRESS IN CONSTRUCTION OF DIESEL ENGINES AS A DETERMINANT OF THE QUALITY OF LIQUID FUELS

Abstract

The paper includes information about development of diesel engines construction as well as the impact of structural factors and physicochemical properties of low-sulfur diesel and biodiesel fuel. The paper presents also forward-looking development strategy of liquid fuels which are mixtures of renewable fuels, especially second generation obtained from hydrotreating of plant oil and animal fat (HVO) and liquid fuels produced from biomass (BTL) through gasification of biomass and bio-waste to synthesis gas as well as synthesis of hydrocarbons by Fischer-Tropsch.

Autorzy:

dr Wincjusz Stanik; Instytut Nafty i Gazu - Państwowy Instytut Badawczy

prof. dr hab. inż. Janusz Jakóbiec AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie