



Potencjał hydrrorafinowanego oleju roślinnego (ang. HVO — Hydrotreated Vegetable Oil) jako biopaliwa wysokoreaktywnego w dwupaliwowych układach zasilania

JANUSZ CHOJNOWSKI, PATRYCJA NOGAS

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, ul. gen. S. Kaliskiego 2, Warszawa 00-908,
janusz.chojnowski@wat.edu.pl, patrycja.nogas@wat.edu.pl

Streszczenie. W czasach intensywnych badań dotyczących zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych do atmosfery z sektora motoryzacyjnego inżynierowie i badacze znajdują efektywne rozwiązania umożliwiające osiągnięcie ten cel. Emisję dwutlenku węgla można zmniejszyć poprzez zwiększenie sprawności silnika spalinowego lub zmniejszenie zawartości węgla w spalonym paliwie. Połączeniem obu tych założeń może być wykorzystanie nowoczesnych układów zasilania dwupaliwowego do silników o zapłonie samoczynnym (ZS), w których dawką pilotażową paliwa wysokoreaktywnego jest hydrrorafinowany olej roślinny (HVO) będący ekologicznym substytutem oleju napędowego. Temat wykorzystania HVO jako paliwa pilotażowego jest niezbadany empirycznie, jednak informacje dostępne na jego temat wskazują na zasadność takich zastosowań.

Słowa kluczowe: hydrrorafinowany olej roślinny (HVO — Hydrotreated Vegetable Oil), CO₂, zasilanie dwupaliwowe, zapłon samoczynny o kontrolowanej reaktywności (RCCI — Reactivity Controlled Compression Ignition), gaz cieplarniany (GHG — Greenhouse Gas)

DOI: 10.5604/01.3001.0015.7011

Wstęp

W spalaniu paliw do silników tłokowych kluczową rolę odgrywają trzy pierwiastki: wodór — H, węgiel — C, tlen — O. Do konwencjonalnego silnika spalinowego nie dostarcza się wodoru ani węgla w czystej postaci — atomy zawarte są w paliwie, dopiero na nim silnik jest w stanie wykonywać pracę. Węgiel w swojej postaci pierwiastkowej jest paliwem stałym, natomiast wodór to gaz o bardzo małej gęstości.

Ze względu na szkodliwe działanie dwutlenku węgla i to, że zalicza się go do grupy gazów cieplarnianych (ang. *Greenhouse Gas* – *GHG*), jego emisja w procesie spalania paliw jest wysoce niepożądana. Z tego względu inżynierowie i badacze kładą nacisk na minimalizację emisji tego składnika spalin. Aby to zrobić, stosuje się paliwa o najniższym stosunku węgla do wodoru. Ze względu na trend systematycznego zmniejszania dopuszczalnej emisji GHG wodór zawarty w wiązaniach chemicznych paliwa jest najbardziej pożądanym pierwiastkiem jako materiał budulcowy paliwa. Zmniejszenie emisji dwutlenku węgla może zostać osiągnięte poprzez zwiększenie sprawności silnika spalinowego lub zmniejszenie zawartości węgla w spalonym paliwie [4]. Rozsądne wykorzystanie paliw alternatywnych pozwoli na redukcję emisji szkodliwych składników spalin poprzez zastosowanie obu tych czynników oraz usprawni działanie silników spalinowych obecnych już na rynku — dzięki procesom *retrofitingu* [6, 9].

2. Właściwości HVO

Hydrorafinowany olej roślinny (ang. *Hydrotreated Vegetable Oil* – *HVO*) to forma syntetycznego, alternatywnego, odnawialnego paliwa do silników o zapłonie samoczynnym, został on wyprodukowany z tłuszczów i olejów roślinnych. Jest otrzymywany w wyniku hydrokrakingu lub uwodornienia oleju roślinnego [15]. Hydrokraking rozbija duże cząsteczki na mniejsze przy użyciu wodoru [14], podczas gdy uwodornienie dodaje wodór do cząsteczek [8]. Metody te można wykorzystać do tworzenia substytutów benzyny, oleju napędowego, propanu, nafty i innych surowców chemicznych [7]. W produkcji HVO wodór jest substratem procesu, gdzie analogicznie w produkcji biodiesla FAME wykorzystuje się metanol [7], katalizatorem dla obu tych procesów jest KOH.

Dzięki temu HVO charakteryzuje się dużo większą stabilnością chemiczną w porównaniu do typowych biopaliw [2]. Przeprowadzono badania dla próbek paliwa (rys. 1):

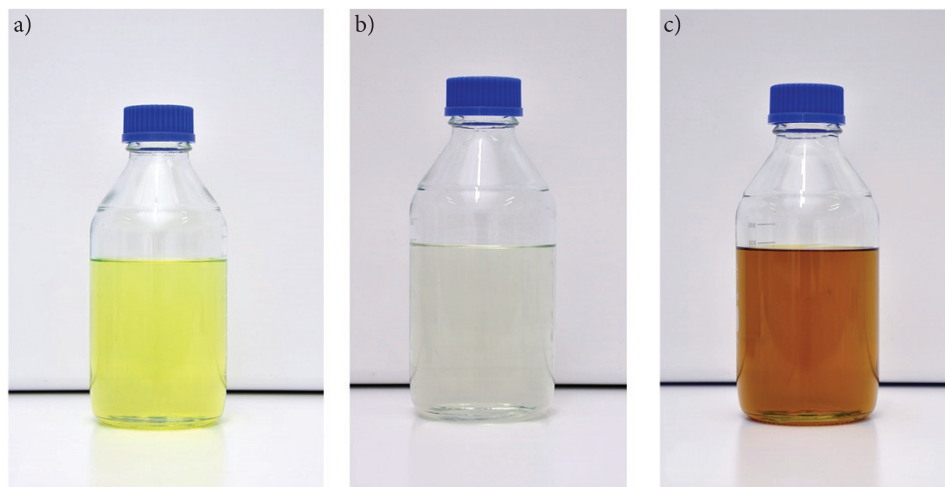
- A — olej napędowy bez dodatku estrów metylowych oleju rzepakowego (ON bez RME),
- B — hydrorafinowany olej roślinny (HVO),
- C — estry metylowe oleju rzepakowego (RME).

Przed przystąpieniem do badania każdą próbkę paliwa przefiltrowano przez filtr membranowy 8×10^{-6} m w celu usunięcia cząstek zanieczyszczeń stałych.

Badano następujące parametry próbek paliw:

- gęstość w temperaturze 15°C (ρ_{15}),
- lepkość kinematyczną w 40°C (n_{40}),
- temperaturę zapłonu (T_Z),

- temperaturę mętnienia (T_M),
- temperaturę zablokowania zimnego filtra (T_{ZZF}),
- temperaturę płynięcia (T_P).



Rys. 1. Wygląd zewnętrzny zbadanych próbek: A — olej napędowy bez dodatku RME (ON bez RME), B —hydorafinowany olej roślinny (HVO), C — estry metylowe oleju rzepakowego (RME)

Źródło: opracowanie własne

Gęstość badano metodą oscylacyjną z U-rurką na podstawie normy PN-EN ISO 12185:2002. Lepkość kinematyczną oznaczono na podstawie normy PN-EN ISO 3104:2004. Temperaturę zapłonu wyznaczono metodą opisaną w normie PN-EN 2719:2016-08, a temperaturę zablokowania zimnego filtra, posilkując się normą PN-EN 116:2015-09, temperaturę mętnienia PN-EN ISO 3015:2019-06, natomiast temperaturę płynięcia PN-EN ISO 3016:2019-06.

Wyniki badań gęstości, lepkości, temperatury zapłonu, zablokowania zimnego filtra, mętnienia i płynięcia zestawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Wyniki badań gęstości, lepkości kinematycznej i temperatury zapłonu próbek paliwa

	Gęstość w temp. 15°C [kg/m ³]	Lepkość kinematyczna w temp. 40°C [mm ² /s]	Temperatura zapłonu [°C]
ON bez RME	826,0 ±0,18	2,28 ±0,01	72,7 ±1,7
HVO	780,0 ±0,18	2,96 ±0,01	78,5 ±0,9
RME	880,0 ±0,18	2,33 ±0,01	165,0 ±3,0

Źródło: opracowanie własne

Z danych w tabeli wynika, że najmniejszą gęstością charakteryzuje się hydro-rafinowany olej roślinny, natomiast największą estry metylowe oleju rzepakowego. Gęstość oleju napędowego bez dodatku RME mieści się w przedziale 820...845 kg/m³, a więc spełnia wymagania jakościowe, podobnie jak RME. W Polsce nie ma przepisów regulujących wymagania jakościowe dla biopaliw ciekłych innych niż estry metylowe kwasów tłuszczowych.

Lepkość kinematyczna paliw płynnych decyduje o przebiegu rozpylania oraz odparowania ON w komorze spalania [2]. Normatywne wymagania jakościowe dla lepkości kinematycznej w temperaturze 40°C dla olejów napędowych wynoszą 2,0...4,5 mm²/s. Wynik badanej próbki ON mieści się w tym przedziale. Pozostałe próbki biopaliw wykazały zbliżone wartości do wyniku otrzymanego dla oleju napędowego bez dodatku RME.

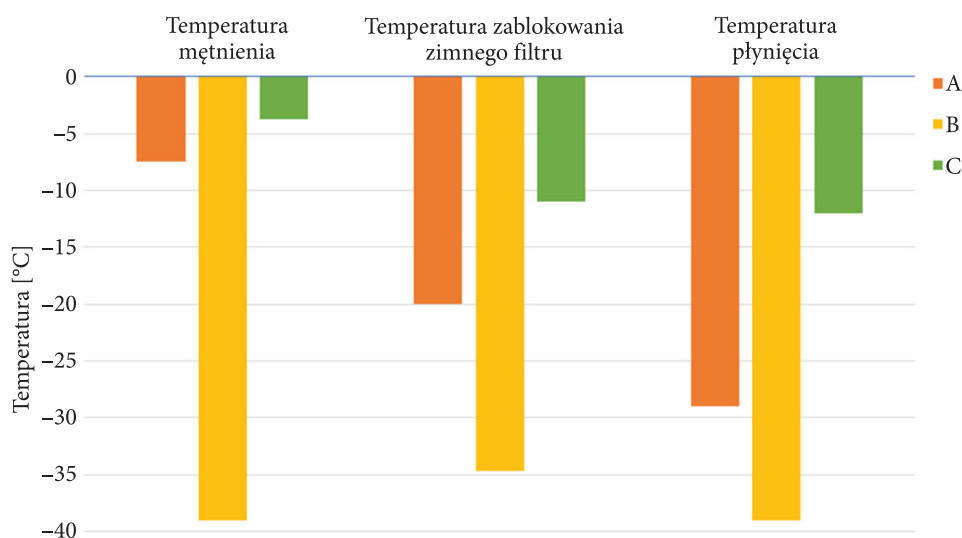
TABELA 2
Wyniki badań temperatury mętnienia, zablokowania zimnego filtra i płynięcia próbek paliwa

	Temperatura mętnienia [°C]	Temperatura zablokowania zimnego filtra [°C]	Temperatura płynięcia [°C]
ON bez RME	-7,5 ±0,7	-20,0 ±1,6	-29,0 ±2,9
HVO	< -39,0	-34,7 ±1,8	< -39,0
RME	-3,8 ±0,5	-11,0 ±0,8	-12,0 ±1,5

Źródło: opracowanie własne

Najniższą temperaturę mętnienia, zablokowania zimnego filtra i płynięcia zaobserwowano dla paliwa HVO, co świadczy o bardzo dobrych właściwościach niskotemperaturowych tego biopaliwa (tab. 2). Badana próbka spełnia wymagania jakościowe w tych trzech aspektach określonych dla paliw ciekłych stosowanych w pojazdach wyposażonych w silnik o zapłonie samoczynnym. Próbka ON bez dodatku RME również spełnia wymagania jakościowe dla okresu użytkowania, w którym została pobrana. Nieco gorsze właściwości ON w stosunku do HVO mogą wynikać z faktu, że badana próbka została pobrana bezpośrednio z bazy paliw i w swoim składzie nie zawiera pakietu dodatków producenta.

Właściwości niskotemperaturowe są bardzo istotne z punktu przydatności eksploatacyjnej. Podczas obniżania temperatury oleju napędowego wydzielają się drobne i twarde kryształki węglowodorów parafinowych, które w miarę schładzania próbki mogą się powiększać i aglomerować. Widoczne jest charakterystyczne zmętnienie próbki. Takie zjawisko może prowadzić do osadzania się kryształów parafin na ściankach zbiornika oraz przewodów paliwa [2]. Spośród badanych próbek paliw estry metylowe oleju rzepakowego charakteryzują się najgorszymi właściwościami niskotemperaturowymi (rys. 2). Wynika z tego, że dodanie RME do ON może wpłynąć na pogorszenie właściwości niskotemperaturowych oleju napędowego.



Rys. 2. Zestawienie temperatury mętnienia, zablokowania zimnego filtra i płynięcia dla próbek: A — ON bez RME, B — HVO, C — RME

Źródło: opracowanie własne

Hydrowerowany olej roślinny charakteryzuje dodatkowo m.in. niska rozpuszczalność w wodzie i wysoka liczba cetanowa. Duże różnice między liczbą cetanową konwencjonalnego oleju napędowego i HVO wymagają pewnych regulacji w sposobie sterowania silnikiem w celu skompensowania samozapłonu paliwa na wcześniejszym etapie cyklu, niemniej nie jest to konieczne do poprawnej pracy silnika. Smarność HVO jest bardzo niska ze względu na brak związków siarki i tlenu w paliwie, z tego powodu wymagany jest dla HVO dodatek smarny. Wartość opałowa hydrowerowanego oleju roślinnego jest wyższa ze względu na wyższą zawartość wodoru. Gęstość jest niższa ze względu na naturę parafinową i niższą końcową temperaturę wrzenia. Tabela nr 3 przedstawia porównawczy wpływ zastosowania HVO i FAME na pracę typowego silnika o zapłonie samoczynnym. Niemal wszystkie czynniki operacyjne są na korzyść HVO.

TABELA 3

Wpływ rodzaju biopaliwa na pracę i eksploatację konwencjonalnego silnika o ZS [15]

	HVO100*	Biodiesel B100 (FAME)
Możliwość wykorzystania w silnikach:	Każdy typ silnika o ZS	Silniki stworzone do pracy tylko na tym paliwie
Właściwości samozapłonowe	Sugerowane skompensowanie różnic wynikających ze zwłoki zapłonu	Podobne do handlowego oleju napędowego
Właściwości smarne	Wymagane jest stosowanie dodatków smarnych	Bardzo dobre

cd. tab. 3

Właściwości niskotemperaturowe	Lepsze w porównaniu do handlowego oleju napędowego	Gorsze w porównaniu do handlowego oleju napędowego, wysoka temperatura mętnienia oraz zablokowania filtra
Atomizacja i odparowanie paliwa w komorze spalania	Na poziomie handlowego oleju napędowego	Pogorszone. Większa gęstość i lepkość oraz niższa lotność
Charakterystyka momentu obrotowego	Znamionowa	Pogorszona
Zużycie paliwa	Na poziomie handlowego oleju napędowego	Większe
Tendencja do tworzenia osadów w układzie paliwowym	Na poziomie handlowego oleju napędowego	Prawdopodobieństwo zwiększonej ilości osadów
Wpływ na zużycie materiałów konstrukcyjnych silnika	Na poziomie handlowego oleju napędowego	Niektóre tworzywa sztuczne oraz lakiery rozpuszczają się w kontakcie z FAME
Wpływ na olej silnikowy	Na poziomie handlowego oleju napędowego	Konieczność częstszej wymiany oleju silnikowego

* 100% zawartości — hydrolizowany olej roślinny

Źródło: opracowanie własne

3. Produkcja i przechowywanie HVO

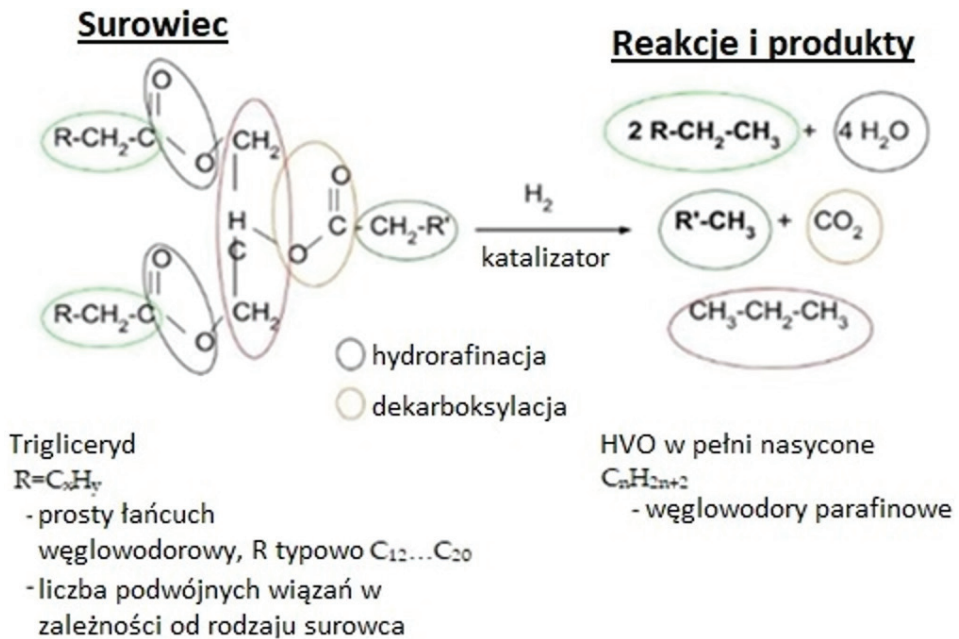
Na rysunku nr 3 przedstawiono schemat procesu hydrokonwersji olejów roślinnych i tłuszczów zwierzęcych, którego produktem końcowym jest HVO.

Biokomponent otrzymywany w procesie hydrokonwersji olejów roślinnych i tłuszczów zwierzęcych, określane jako HVO, to węglowodorowa frakcja parafinowa uzyskana w wyniku katalitycznego procesu hydrokonwersji trójglicerydów kwasów tłuszczowych. Jeżeli stosuje się materiał niespożywczy lub odpadowy, jest on klasyfikowany jako składniki biomasy drugiej generacji. Trójglicerydy można podzielić na proste, zawierające trzy identyczne kwasy tłuszczowe, oraz złożone, składające się z trzech różnych kwasów tłuszczowych. Ze względu na obecność wiązań podwójnych kwasy tłuszczowe można podzielić na nasycone, jednonienasycone i wielonienasycone [8]. Właściwości fizykochemiczne triglicerydu zależą od właściwości kwasów tłuszczowych, a w przypadku złożonych triglicerydów od względnego położenia poszczególnych kwasów w cząsteczce triglicerydu. Triglicerydy nasyconych kwasów tłuszczowych mają wysoką temperaturę krzepnięcia (powyżej 30°C) i lepszą stabilność oksydacyjną niż triglicerydy nienasyconych kwasów tłuszczowych, które są bardziej reaktywne ze względu na obecność wiązań podwójnych [8].

Proces hydrokonwersji triglicerydów kwasów tłuszczowych składa się z trzech etapów [15]:

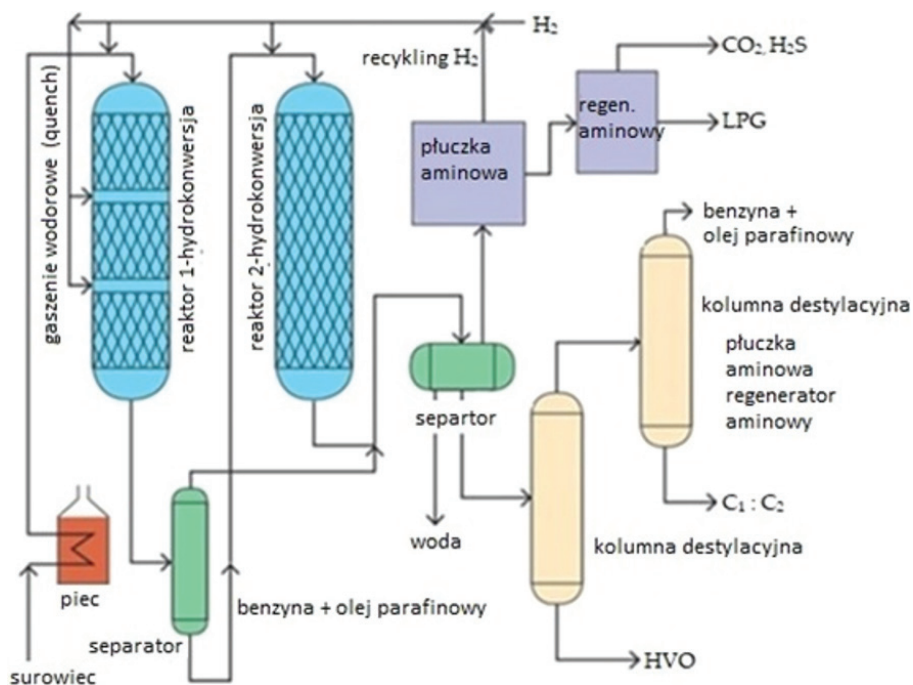
- uwodornienie wiązań podwójnych w łańcuchach węglowodorowych triglicerydów,
- rozpad cząsteczki triglicerydów na propen i kwasy tłuszczowe,
- rozkład kwasów tłuszczowych na węglowódor n-parafinowy za pomocą wody, dwutlenku węgla, tlenku węgla oraz uwodornienia propenu do propanu.

Na rysunku 4 przedstawiono schemat procesu produkcji HVO.



Rys. 3. Tworzenie i skład chemiczny HVO [15]

HVO w porównaniu do biodiesla produkowanego na bazie oleju rzepakowego (RME) lub olejów roślinnych (FAME) zachowuje bardzo dobre właściwości magazynowe (tabela 4). Jest mniej higroskopijny, charakteryzuje się stosunkowo długim rozkładem biologicznym i nie ma tendencji do pienienia i do sedymentacji w instalacjach magazynowych.



Rys. 4. Schemat procesu produkcji HVO [8]

TABELA 4

Wpływ rodzaju biopaliwa do silników o ZS na system dystrybucji i magazynowania [15]

	HVO	RME/FAME
Kontakt z wodą	Niewielka skłonność do tworzenia stabilnych mieszanin	Możliwość rozkładu (hydrolizy), tworzenia trwałych emulsji z wodą, tworzenia związków korozyjnych
Rozpuszczalność wody w paliwie	Mała	Duża higroskopijność
Skłonność do pienienia	Mała	Duża
Podatność na skażenie mikrobiologiczne	Mała	Duża
Stabilność paliwa podczas długotrwałego przechowywania	Bardzo dobra, mała podatność na procesy starzenia	Szybka degradacja paliwa w wyniku procesów starzenia, konieczność stosowania skutecznych dodatków antyoksydacyjnych
Skłonność do tworzenia osadów	Mała	Duża
Biodegradowalność	Mała, wolna dekompozycja	Duża, szybka dekompozycja

Źródło: opracowanie własne

Pionierem w badaniach hydrokonwersji olejów roślinnych i tłuszczów zwierzęcych na składniki paliw węglowodorowych, a następnie komercjalizacji tej technologii na skalę przemysłową był koncern naftowy Neste Oil. W Finlandii w lipcu 2007 roku uruchomiono pierwszą na świecie przemysłową instalację do produkcji wysokowęglowodanowych biokomponentów do oleju napędowego z naturalnych olejów i tłuszczów pod nazwą NExBTL o zdolności produkcyjnej 170 000 ton rocznie [8, 14]. W wyniku rozwoju tej technologii proces HVO oferowany jest przez takie firmy jak:

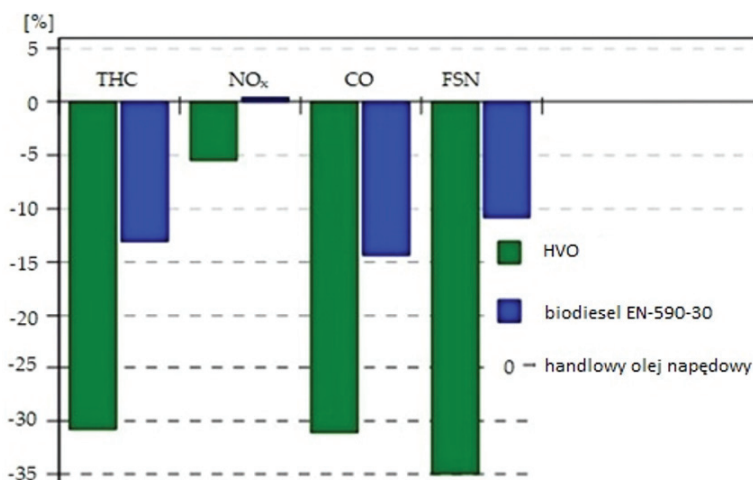
- Axens IFP (Vegan),
- Honeywell UOP (Ecofining - Green Diesel),
- Neste Oil (NExBTL),
- Syntroleum,
- UPM (BioVerno).

Na polskim rynku nowoczesną technologię uwodornienia olejów roślinnych wdroży PKN ORLEN w zakładzie produkcyjnym w Płocku. Jest to działanie zgodne z planem ORLEN 2030, które wzmocni pozycję koncernu na rynku biopaliw. Będzie też odpowiedzią na pakiet Unii Europejskiej o nazwie „Fit for 55”, stawiający przed przemysłem rafineryjnym kolejne wyzwania w zakresie ograniczenia emisyjności paliw transportowych. Realizacja inwestycji planowana jest na czerwiec 2024 roku. Łącznie moce produkcyjne istniejących przemysłowych instalacji HVO na świecie przekroczyły 3 mln ton rocznie [16].

4. Emisja szkodliwych składników spalin

Dotychczas przeprowadzone badania wskazują na korzyści środowiskowe i eksploatacyjne HVO jako odnawialnego biopaliwa dla silników o ZS oraz są powtarzalne. Większość dostępnych prac wykazała, że użycie HVO zwykle prowadzi do obniżenia emisji składników spalin. Oficjalna informacja z firmy Neste, dostępna w dokumencie *Renewable Diesel Handbook*, mówi, że przy użyciu HVO zredukowano 90% emisji CO₂ w porównaniu z handlowym olejem napędowym [15].

Wykazano również znaczące redukcje emisji dla HC, NO_x, CO [1]. Istotny wpływ na emisję cząstek stałych, HC i CO zaobserwowano w pracach Murtonena i Aakko-Saksa [11], [12]. Zestawili oni wyniki emisji dla biodiesla EN 590-30, HVO oraz handlowego oleju napędowego. Testy przeprowadzono na stanowiskach-hamowniach z wykorzystaniem silników autobusów miejskich oraz w trakcie rzeczywistych przejazdów pojazdów w ruchu drogowym. W większości przypadków wszystkie regulowane prawnie emisje, takie jak NO_x, PM, CO i HC, zmniejszyły się dla HVO w porównaniu ze zwykłym olejem napędowym [10] — jak na rysunku poniżej (rys. 5).



Rys. 5. Emisja THC, NO_x, CO i FSN dla silnika zasilanego HVO, biodieslem EN-590-30 i handlowym olejem napędowym [10]

Według innej pracy [3], w której przeprowadzono badania emisji spalin dla różnych wielkości silników (jednostki napędowe pojazdów ciężarowych i osobowych), zauważono redukcję cząstek stałych, emisji tlenku węgla oraz węglowodorów.

Badania przeprowadzone przez Soo-Young [12] w 2014 roku wykazały, że zastosowanie HVO w silniku bez zmian konstrukcyjnych bądź modyfikacji w sposobie jego sterowania zmniejsza emisje NO_x, cząstek stałych, HC i CO. Zgodnie z badaniem [3], w którym przeprowadzono testy emisji spalin na wysokoobciążonych turbodoładowanych silnikach o ZS, zauważono średnie redukcje wszystkich składników emisyjnych spalin. Najbardziej znaczącą redukcję o około 35% zmierzono w zadymieniu. Dzięki HVO emisja NO_x została zmniejszona o około 5%. Odnotowano również zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa o 5%. W tym zestawieniu zalety stosowania HVO pojawiają się również w kontekście typowego biodiesla [13].

Badania przeprowadzone w Lublinie przez dr. hab. inż. Jacka Hunicza oraz dr. inż. Pawła Kordosa wykazały, że HVO jest dużo bardziej odporne niż ON na duże współczynniki nastaw układu recyrkulacji spalin (ang. *Exhaust gas recirculation* — EGR). Cecha ta umożliwia uzyskanie spalania niskotemperaturowego dzięki dużemu ucząsteczkowaniu (rozdrobieniu cząstek tru paliwa). HVO umożliwia uzyskanie sprawności cieplnej na poziomie 43%, przy zachowaniu emisji NO_x i CO na poziomie normy Euro VI. Jest to wynik o 1,5% lepszy niż zoptymalizowane spalanie ON, przy jednoczesnym zmniejszeniu emisji wszystkich składników spalin, w szczególności aldehydów i węglowodorów aromatycznych [7].

Jak zauważono powyżej, większość badań wskazuje HVO jako paliwo, które może przyczynić się do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych. Inna obserwacja

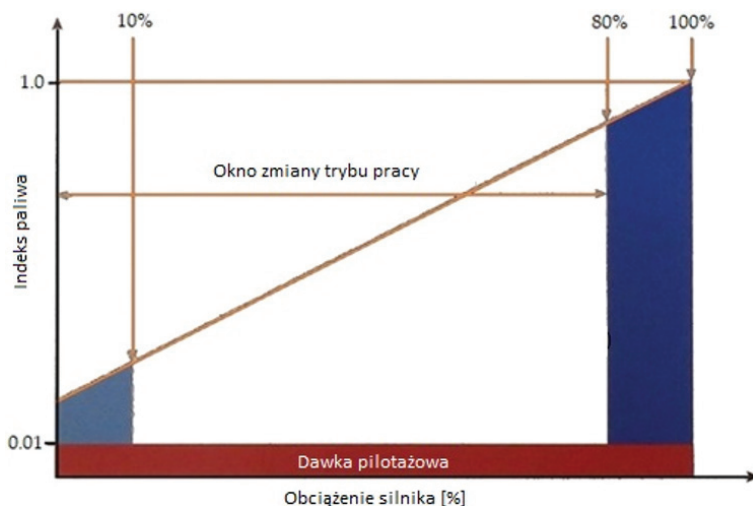
jest taka, że w większości przypadków HVO jest badane w warunkach ustalonej pracy silnika lub pojazdu, co skutkuje brakiem informacji w warunkach niestabilnych, które występują przez większość okresu eksploatacji pojazdu. Brak również informacji o stosowaniu HVO jako dawki pilotażowej w kontekście dwupaliwowych systemów zasilania.

5. HVO jako dawka pilotażowa paliwa

W silnikach o zasilaniu dwupaliwowym paliwo niskoreaktywne (benzyna, alkohol, CNG, LPG, HCNG, biometan lub inne paliwa) o wysokiej liczbie oktanowej dostarczane jest do komory spalania wraz z powietrzem poprzez układ dolotowy. Paliwo o niskiej reaktywności jest sprężane i mieszane z powietrzem do postaci wstępnie zmieszanej palnej mieszanki paliwowo-powietrznej. Ze względu na wysoką odporność na samozapłon i spalanie stukowe mieszanka ta nie zapali się pomimo wysokiej temperatury i ciśnienia w cylindrze. W pobliżu górnego martwego położenia tłoka w cylindrze wtryskiwane jest paliwo wysokoreaktywne (zwane też dawką pilotażową), tj. olej napędowy, RME, GTL, CTL czy HVO. Paliwo to musi charakteryzować się dobrymi właściwościami samozapalnymi, w tym niską temperaturą samozapłonu oraz możliwością dużej atomizacji paliwa w procesie jego wtrysku. Zapłon wysokoreaktywnego paliwa inicjuje zapłon powietrza z niskoreaktywnym wysokooktanowym paliwem. Istotą sterowania momentem zapłonu i przebiegiem spalania paliw stosowanych w silniku jest czas wtrysku (zarówno czas otwarcia wtryskiwacza, jak i moment rozpoczęcia wtrysku) i właściwości paliwa wysokoreaktywnego [5]. W zależności od rozwarstwienia i stopnia wymieszania paliwa wysokooktanowego z powietrzem przebieg jego spalania można scharakteryzować w różny sposób, co często stanowi kluczową kwestię w badaniach spalania typu *Reactivity Controlled Compression Ignition* (RCCI). Ilość wykorzystywanego paliwa danego rodzaju jest uzależniona w największym stopniu od obciążenia silnika oraz możliwości realizacji dozowania przez zastosowane układy wtrysku paliwa. Na rysunku 6 przedstawiono wykres z zależnością obciążenia silnika od możliwości wykorzystania obu paliw w różnych proporcjach.

Na poniższym rysunku kolor czerwony oznacza aktywny wtrysk paliwa pilotażowego, jasnoniebieski, że silnik można uruchomić na gazie, zsynchronizować i obciążać — silnik po pewnym czasie przełączy się na tryb dwupaliwowy, o ile obciążenie nie jest zwiększane poza ten obszar, a kolor ciemnoniebieski oznacza, że ten silnik jest w stanie pracować do 100% obciążenia na dowolnym paliwie, ale transfery z zasilania jednopaliwowego na dwupaliwowe są niedozwolone powyżej 80% obciążenia — transfery odwrotne są dozwolone przy dowolnym obciążeniu [5]. Powyższe informacje wskazują, że nawet nowoczesne układy dwupaliwowe (w szczególności układy typu *retrofit*) część czasu pracy realizują, pracując tylko

na paliwie wysokoreaktywnym. Dlatego też nawet przy dużych współczynnikach wymiany paliwa bazowego (wysokoreaktywnego) na paliwa niskoreaktywne istotne jest, by paliwo ciekło było możliwie jak najbardziej ekologiczne i charakteryzowało się niską emisją GHG w trakcie spalania.



Rys. 6. Teoretyczne okno trybów pracy zasilania silnika dwupaliwowego [5]

Jeżeli możliwe jest wytworzenie jednorodnej mieszanki paliwa gazowego z powietrzem, paliwo to może również ulec samozapłonowi pod wpływem nacisku wywiebranego na nie przez szybko spalające się paliwo o wysokiej reaktywności. Alkohole będące biopaliwami zawierają w swoich związkach oprócz wodoru i węgla również tlen, który zmniejsza gęstość energetyczną paliwa, ale może ułatwiać tworzenie się jednorodnej mieszanki w komorze spalania. Wiele biopaliw (w tym HVO) zawiera w swoim składzie chemicznym alkohole. Wskazuje to na dużą zasadność stosowania tych paliw w silnikach z zapłonem RCCI [2, 4, 6].

Dzięki zastosowaniu niskoreaktywnego paliwa jednorodnie wymieszanego z powietrzem zwiększa się efektywność wykorzystania energii chemicznej zawartej w paliwie. Na wzrost efektywności ma również wpływ równomierny rozkład temperatury w komorze spalania. Zmniejsza to całkowitą ilość ciepła przenikającego przez ściany cylindra i zapobiega tworzeniu się gorących punktów w cylindrze. Dzięki równomiernemu i niskotemperaturowemu przebiegowi procesu spalania zmniejsza się emisja tlenków azotu, cząstek stałych i sadzy. Wysoka temperatura płomienia jest jednym z głównych czynników powodujących powstawanie tlenków azotu podczas procesu spalania. W silnikach RCCI tlenki azotu nie tworzą się tak intensywnie jak w klasycznym silniku wysokoprężnym, również ze względu na spalanie w składzie zbliżonym do składu stechiometrycznego. Ilość tlenu i azotu w komorze spalania

podczas procesu jest zatem zmniejszona w porównaniu do klasycznego silnika wysokoprężnego [5, 6]. W silnikach dwupaliwowych niedziałających w trybie RCCI spalanie nie jest jednorodne w objętości czynnika roboczego ani w funkcji kąta obrotu wału korbowego. Zmniejszenie kinetycznej prędkości spalania (w stosunku do konwencjonalnego silnika ZS) powoduje mniej wytworzonych NO_x, natomiast wzrost dyfuzyjnej prędkości spalania zmniejsza emisję PM. Wzrost temperatury w dyfuzyjnej fazie spalania powoduje dopalenie większej części powstałych wcześniej cząstek sadzy i w bilansie ogólnym zmniejsza emisję PM w spalinach dla tego typu silników.

Podsumowując powyższe informacje bazujące na dostępnej wiedzy, należy zauważyć, że istnieje potencjał wykorzystania HVO jako dawki paliwa wysokoreaktywnego (pilotażowego) w kontekście nowoczesnych systemów dwupaliwowych w celu zmniejszenia ogólnej emisji gazów cieplarnianych. Dalsze badania empiryczne na ten temat powinny zostać zrealizowane.

6. Podsumowanie

- Zmniejszenie emisji dwutlenku węgla można osiągnąć poprzez zwiększenie sprawności silnika spalinowego lub zmniejszenie zawartości węgla w spalonym paliwie.
- HVO to forma substytutu oleju napędowego o zmniejszonej zawartości cząstek węgla. Charakteryzuje się lepszymi właściwościami fizykochemicznymi i eksploatacyjnymi w porównaniu do ON i RME/FAME.
- HVO jest paliwem odnawialnym produkowanym w dużych ilościach na świecie i o lepszych niż konwencjonalne biopaliwa właściwościach logistyczno-magazynowych. Od 2024 roku HVO będzie produkowane i dystrybuowane w Polsce, co wskazuje na dobrą dostępność tego paliwa w przyszłości.
- Dotychczasowe badania wskazują na korzyści środowiskowe i eksploatacyjne HVO jako odnawialnego biopaliwa dla silników jednopaliwowych o ZS oraz są powtarzalne. Brakuje badań na temat emisji w wykorzystaniu HVO w układach dwupaliwowych.
- Istnieje potencjał wykorzystania HVO jako dawki paliwa wysokoreaktywnego (pilotażowego) w kontekście nowoczesnych systemów dwupaliwowych w celu zmniejszenia ogólnej emisji gazów cieplarnianych. Należy wykonać badania laboratoryjne w celu potwierdzenia lub obalenia tej tezy.

Źródło finansowania pracy — działalność statutowa Wojskowej Akademii Technicznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.12.2021. Zatwierdzono do publikacji 12.01.2022.

Patrycja Nogas: <https://orcid.org/0000-0003-1792-2530>

Janusz Chojnowski: <https://orcid.org/0000-0002-9296-1786>

LITERATURA

- [1] AATOLA H., LARMI M., SARJOVAARA T., MIKKONEN S., *Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel: Trade-off between NOx, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy-Duty Engine*, SAE International Journal of Engines, 1, 1, 2009, 1251-1262.
- [2] BACZEWSKI K., KAŁDOŃSKI T., *Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym*, WKŁ, Warszawa 2008.
- [3] DIMITRIADIS A., NATSIOS I., DIMARATOS A., KATSAOUNIS D., SAMARAS Z., BEZERGIANNI S., LEHTO K., *Evaluation of a Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) and Effects on Emissions of a Passenger Car Diesel Engine*, Frontiers in Mechanical Engineering, 4, 7, 2018.
- [4] DZIUBAK T., *Experimental Studies of Dust Suction Irregularity from Multi-Cyclone Dust Collector of Two-Stage Air Filter*, Energies, 14, 2021.
- [5] GHAZI A.K., *Dual-Fuel Diesel Engines*, CRC Press, 2021.
- [6] HEYWOOD J.B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 2nd Edition, McGraw-Hill Education, New York, 2018.
- [7] HUNICZ J., KORDOS P., *Spalanie hydrorafinowanego oleju roślinnego w silniku o zapłonie samoczynnym*, Politechnika Lubelska, 2018, <http://lctt.pollub.pl> › RID › Spalanie_hydorafinowe.
- [8] JĘCZMIONEK Ł., *Zagadnienia hydrokonwersji olejów roślinnych i tłuszczów zwierzęcych do węglowodorowych biokomponentów parafinowych (HVO)*, Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu, Kraków, 185, 2012, 1-308.
- [9] KARCEWSKI M., SZCZĘCH L., *Influence of the F-34 unified battlefield fuel with bio components on usable parameters of the IC engine*, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 18, 3, 2016, 358-366.
- [10] KURONEN M., MIKKONEN S., AAKKO P., MURTONEN T., *Hydrotreated Vegetable Oil as Fuel for Heavy Duty Diesel Engines*, SAE Technical Paper, 2007, <https://doi.org/10.4271/2007-01-4031>, [dostęp: 28.12.2021].
- [11] MURTONEN T., AAKKO-SAKSA P., KURONEN M., MIKKONEN S., LEHTORANTA K., *Emissions with Heavy-Duty Diesel Engines and Vehicles Using FAME, HVO and GTL Fuels with and without DOC + POC Aftertreatment*, SAE Technical Paper, 2009, <https://doi.org/10.4271/2009-01-2693>, [dostęp: 28.12.2021].
- [12] SOO-YOUNG N., *Application of hydrotreated vegetable oil from triglyceride-based biomass to CI engines – A review*, Fuel, 115, 2014, 88-96.
- [13] SUGIYAMA K., GOTO I., KITANO K., MOGI K. et al., *Effects of Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as Renewable Diesel Fuel on Combustion and Exhaust Emissions in Diesel Engine*, SAE Int. J. Fuels Lubr., 5, 1, 2012, 205-217.
- [14] Strona firmy Lotos. *Słownik*, https://www.lotos.pl/156/centrum_prasowe/slownik [dostęp 28.12.2021].
- [15] *Neste renewable diesel handbook*, https://www.neste.com/sites/neste.com/files/attachments/neste_renewable_diesel_handbook.pdf [dostęp 28.12.2021].
- [16] <https://www.ornl.pl/content/internet/ornl/pl/pl/relacje-inwestorskie/raporty-i-publicacje/raporty-biezace/2021/03/Raport-biezacy-nr-40-2021> [dostęp 11.01.2022].

J. CHOJNOWSKI, P. NOGAS

**The potential of hydrotreated vegetable oil (HVO) as a high reactive biofuel
in dual fuel systems**

Abstract. In times of increased efforts to reduce greenhouse gas emissions to the atmosphere from the automotive sector, engineers and researchers are finding effective solutions to achieve this goal. The reduction of carbon dioxide emissions can be achieved by increasing the efficiency of the internal combustion engine or by reducing the carbon content in the fuel burned. The combination of both of these assumptions can be the use of modern dual-fuel systems for diesel engines in which the pilot dose of highly reactive fuel is hydrotreated vegetable oil (HVO), which is an ecological substitute for diesel oil. The topic of the use of HVO as a pilot fuel is empirically unexplored, however the available information on it indicates the validity of such applications.

Keywords: HVO, CO₂, dual-fuel, RCCI (reactivity controlled compression ignition), GHG (greenhouse gas)

DOI: 10.5604/01.3001.0015.7011

