

Zygmunt SZLACHTA
Sławomir DUDEK

ZASILANIE BIOPALIWAMI SILNIKÓW POJAZDÓW ROLNICZYCH

The biofuelling agricultural vehicle engines

Wstęp

Biopaliwami lub paliwami zielonymi nazywane są paliwa pochodzące z surowców rolnych, a więc alkohole, naturalne oleje roślinne i oleje roślinne przetworzone chemicznie dla uzyskania własności fizykochemicznych zbliżonych do oleju napędowego. Szczególnie cenną cechą takich paliw w porównaniu z paliwami kopalnymi jest to, że ich użytkowanie prawie nie przyczynia się do wzrostu zawartości w atmosferze dwutlenku węgla, wywołującego efekt cieplarniany. Zainteresowanie biopaliwami wynika nie tylko z ograniczonych zasobów naturalnych źródeł energetycznych i coraz ostrzejszych norm dotyczących emisji związków toksycznych ze spalinami. Ma ono również związek z nadprodukcją żywności i rosnącym bezrobociem na wsi.

Specyfiką rolnictwa jest powszechne stosowanie do napędu pojazdów, maszyn i urządzeń silników wysokoprężnych. Biopaliwa muszą więc mieć zdolność wytwarzania mieszaniny palnej i samozapłonu oraz możliwie całkowitego i zupełnego spalania się w warunkach istniejących w komorze spalania.

Charakterystyka alkoholi

Wśród alkoholi największe znaczenie jako paliwa silnikowe mają alkohole metylowy i etylowy.

Alkohol metylowy CH_3OH – metanol – najprostszy alkohol alifatyczny, bezbarwny i silnie trujący. Dawniej otrzymywany był w procesie suchej destylacji drewna (stąd nazwa „spirytus drzewny”), obecnie otrzymywany jest z gazu ziemnego lub w wyniku syntezy tlenku węgla i wodoru $\text{CO} + 2\text{H} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$.

Dr hab. inż. **Zygmunt Szlachta**, prof. PK, mgr inż. **Sławomir Dudek**, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej.

Alkohol etylowy C_2H_5OH – etanol – alkohol alifatyczny, bezbarwny o piekącym smaku i charakterystycznym zapachu. Otrzymywany jest w procesie fermentacji alkoholowej surowców zawierających cukry (owoce, buraki, ziemniaki, pszenice, żyta itp.), a także syntetycznie – przez katalityczną lub kwaśną hydratację etylenu oraz przez uwodornienie aldehydu octowego.

Alkohole sprawiają duże trudności w zastosowaniu jako paliwo do silników wysokoprężnych, głównie z powodu:

- niskiej liczby cetanowej, a więc słabej zdolności do samozapłonu,
- dużej wartości utajonego ciepła parowania, co jest powodem trudności odparowywania paliwa i rozruchu zimnego silnika,
- małej wartości opałowej, co skutkuje wzrostem zużycia paliwa i koniecznością stosowania większych wydatków pomp wtryskowych,
- nie mieszają się z olejem napędowym i przejmują wilgoć z otoczenia, a więc dla uzyskania stabilnych mieszanin oleju napędowego i alkoholu trzeba stosować odpowiedni emulgator,
- słabych własności smarnych, co powoduje, że dla zapewnienia prawidłowej pracy układu wtryskowego konieczne byłoby dodawanie środków smarnych, np. oleju silnikowego,
- mają własności korozyjne (zwłaszcza metanol) i działają niszcząco na gumę i niektóre tworzywa sztuczne.

Jednocześnie zawierają dużo tlenu, co korzystnie wpływa na obniżenie emisji toksycznych składników spalin. W tabeli 1 zawarto niektóre własności alkoholi w porównaniu z olejem napędowym i benzyną. Należy podkreślić, że więcej korzystnych cech wykazują alkohole w zastosowaniu do silnika z zapłonem iskrowym. Zwraca uwagę przewaga alkoholu etylowego nad metylowym w zakresie wartości opałowej i liczby oktanowej. Zmieszany z benzyną trudniej się rozwarstwia także w niższych temperaturach. Jednak do mieszania z benzyną nadaje się wyłącznie odwodniony alkohol etylowy.

Tabela 1. Wybrane właściwości alkoholi i paliw tradycyjnych [7], [9]

Właściwość	Jednostka miary	Metanol CH ₃ OH	Etanol C ₂ H ₅ OH	Benzyna	Olej napę- dowy
Gęstość (20°C)	kg/m ³	791	789	740	840
Lepkość kinematyczna	cSt	0,8	0,9	0,6	4,0
Wartość opałowa paliwa	MJ/kg MJ/dm ³	19,8 15,6	27,0 21,3	44,0 32,5	42,5 35,7
Wartość opałowa mieszanki λ = 1	kJ/m ³	3175	3650	3439	3475
Stała stechiometryczna	kg /kg	6,4	9,4	14,9	14,6
Liczba oktanowa MON	-	92	95	84	-
RON	-	110		92	-
Liczba cetanowa	-	3	8	14	45÷55
Skład elementarny c	kg C/kg pal	0,375	0,521739	0,864865	0,870
h	kg H/kg pal	0,125	0,130435	0,135135	0.125
o	kg O/kg pal	0,5	0,341782	0	0.005

Układy zasilania silników wysokoprężnych paliwami alkoholowymi

W tabeli 2 zaprezentowano różne możliwości zastosowania alkoholi jako paliwa w silnikach wysokoprężnych. Jak widać, wiążą się one z użyciem samego alkoholu lub mieszanin alkoholu z olejem napędowym. Stosownie do rozważanego wariantu wymagane są zmiany w konstrukcji i regulacji silnika, a niekiedy również w systemie zapłonu.

Tabela 2. Układy zasilania silników wysokoprężnych paliwami alkoholowymi

Paliwo	Układ zasilania	Zapłon	Zmiany w konstrukcji i regulacji silnika ZS
Roztwór alkoholu w oleju napędowym	Standardowy układ zasilania silnika wysokoprężnego	Samoczynny	Zwiększenie dawkowania pompy wtryskowej
Emulsja (alkohol, olej napędowy + emulgator)	Standardowy układ zasilania silnika wysokoprężnego	Samoczynny	Zwiększenie dawkowania pompy wtryskowej
Alkohol + dodatek zwiększający skłonność do samozapłonu	Standardowy układ zasilania silnika: wtrysk alkoholu z dodatkami poprawiającymi samozapłon do komory spalania lub wtrysk czystego alkoholu do powietrza sprężonego w komorze spalania, zmieszanego z dodatkami poprawiającymi samozapłon	Samoczynny	Podwyższenie stopnia sprężania Wypożyczenie silnika w system dozujący dodatki Konieczność smarowania aparatury wtryskowej Zwiększenie dawkowania pompy wtryskowej Zwiększenie średnic otworów rozpylaczy
Alkohol + olej napędowy	Pilotująca dawka oleju napędowego jest dostarczana standardowym układem zasilania silnika, a zasadnicza dawka alkoholu dodatkowym układem wtryskowym do cylindra lub kolektora dolotowego, albo mieszalnikiem	Samoczynny, inicjowany pilotującą dawką oleju napędowego	Dodatkowa instalacja paliwowa
Alkohol	Standardowy układ zasilania silnika wysokoprężnego	Samoczynny, wspomagany świecą żarową lub gorącą wkładką	Zwiększenie dawkowania pompy wtryskowej Zwiększenie średnic otworów rozpylaczy Konieczność smarowania aparatury wtryskowej Dodatkowa instalacja elektryczna dla grzania świecy
Alkohol	Wtrysk alkoholu do kolektora dolotowego lub przygotowanie mieszaniny alkohol-powietrze w mieszalniku	Iskrowy	Zmniejszenie stopnia sprężania i komory spalania Wypożyczenie silnika w układ zapłonowy Układ zasilania paliwem alkoholowym

Ze względu na dostępność surowca można by rozważać użycie alkoholu etylowego w silnikach wysokoprężnych stosowanych w rolnictwie. Z tabeli 2 wynika, że sam etanol mógłby być stosowany jedynie w silnikach w pełni do

tego celu przystosowanych. Tylko wtedy, jak wykazują np. doświadczenia [1, 2], można uzyskać znaczne korzystne efekty obniżenia emisji toksycznych składników spalin, zwłaszcza emisji tlenków azotu i cząstek stałych. Natomiast w silnikach nie przystosowanych do tego paliwa istnieje ryzyko wzrostu emisji nie tylko aldehydów, ale i tlenku węgla. Ponieważ emisja CO w silnikach wysokopiętnych jest niewielka, to problemem mogą być aldehydy, które trzeba wtedy neutralizować w konwertorze katalitycznym.

Jednym z często spotykanych rozwiązań jest przystosowanie silnika wysokopiętnego do spalania paliw alkoholowych poprzez zmianę zapłonu samoczynnego na zapłon iskrowy (podobnie jak to ma miejsce w przypadku zasilania paliwem gazowym). Realizowane jest to poprzez wyposażenie silnika w instalację zapłonową i zmianę stopnia sprężania oraz kształtu komory spalania. Pomimo dużego stopnia modyfikacji silnika, można osiągnąć wzrost mocy silnika dzięki utajonemu ciepłu parowania alkoholu, które schładzając ładunek, zwiększa jego gęstość i pozwala na spalanie większych ilości paliwa.

Charakterystyka olejów roślinnych

W polskich warunkach dobre efekty ekonomiczne uzyskuje się z uprawy rzepaku i ta roślina może stanowić główne źródło paliw do silnika wysokopiętnego. Naturalny olej rzepakowy ma tylko nieco większą gęstość od oleju napędowego, ale aż kilkunastokrotnie większą lepkość i znacznie gorszą lotność, co uniemożliwia jego bezpośrednie użycie jako paliwa do silnika wysokopiętnego. Dlatego naturalny olej rzepakowy w czystej postaci może być stosowany tylko w specjalnie do tego celu skonstruowanych silnikach. Natomiast powszechnie przyjęto inne rozwiązanie problemu dużej lepkości oleju naturalnego. Polega ono na chemicznym przetworzeniu naturalnego oleju rzepakowego będącego mieszaniną estrów gliceryny i kwasów tłuszczowych do postaci estrów metylowych kwasów tłuszczowych. Uzyskuje się wówczas paliwo, które przy niewielkich ograniczeniach może być traktowane jako całkowicie zamienne z olejem napędowym, gdyż jego właściwości są bardzo zbliżone do właściwości oleju napędowego.

Paliwo takie, będące mieszaniną estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego, w literaturze zachodniej nazywane jest biodiesel i przeważnie ogólnie oznaczane jest jako RME – rape methyl ester (rzepakowy ester metylowy), rzadziej jako FAME – fatty acid methyl esters (estry metylowe kwasów tłuszczowych). W Czechach i na Słowacji używana jest nazwa bionafta, a we Francji – diester. Natomiast w projekcie polskiej normy używany jest skrót EMKOR – estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego. Stosowanie EMKOR nie wymaga wprowadzania zmian w układzie zasilania i systemie spalania klasycznego silnika wysokopiętnego, tj. zasilanego normalnie olejem

napędowym. Proces chemicznej przeróbki oleju rzepakowego, tzw. transestryfikacja, zwiększa jednak znacznie koszty paliwa, przez co maleje jego konkurencyjność w stosunku do oleju napędowego. Można stosować zarówno czyste EMKOR, jak i mieszaniny tego paliwa z olejem napędowym, zawierające najczęściej do 5% EMKOR w oleju napędowym.

Specyfika polskiego rolnictwa przejawiająca się w dużej liczbie właścicieli niewielkich gospodarstw rolnych powoduje, że istnieje duża grupa użytkowników ciągników rolniczych i pojazdów napędzanych silnikami wysokoprężnymi. Dlatego dla tej grupy producentów rzepaku i użytkowników silników wysokoprężnych bardziej atrakcyjne mogłoby być rozwiązanie pośrednie, polegające na zastosowaniu do zasilania silników mieszanin naturalnego oleju rzepakowego z olejem napędowym. Badania w tym zakresie wskazują, że mieszaniny oleju rzepakowego z olejem napędowym pozwalają w znacznym stopniu ograniczyć, a nawet wyeliminować podstawowe wady użycia samego oleju rzepakowego (wysoka lepkość i wytwarzanie osadów w komorze spalania) [11]. Przy niewielkich ilościach naturalnego oleju rzepakowego w mieszaninie z olejem napędowym można uzyskać parametry silnika wysokoprężnego zbliżone do stwierdzanych przy zasilaniu olejem napędowym. Jednak upowszechnienie tej koncepcji wymagałoby bardziej szczegółowych badań dla uściślenia warunków stosowania takich mieszanin (warunki eksploatacji silnika, wymagane własności oleju rzepakowego, zawartość oleju rzepakowego w mieszaninie, przechowywanie paliwa, itd.).

W tabeli 3 zawarto niektóre własności paliw rzepakowych w porównaniu z olejem napędowym.

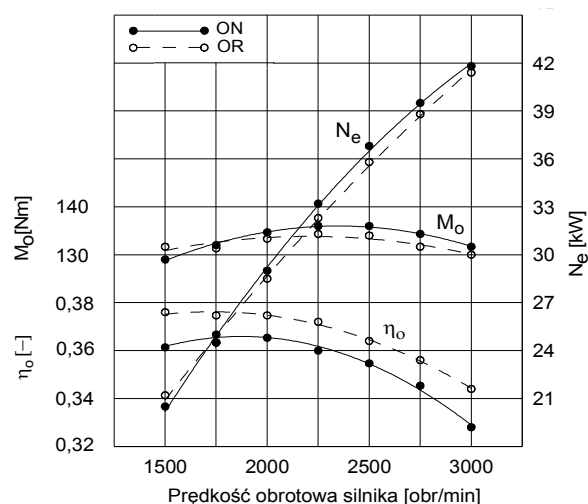
Tabela 3. Wybrane właściwości paliw rzepakowych i oleju napędowego [7, 9]

Właściwość	Jednostka miary	Olej rzepakowy	EMKOR	Olej napędowy zimowy	
Gęstość (20°C)	kg/m³	915	880	825	
Lepkość kinematyczna w 20°C	mm²/s	76	7,5	4,2	
Wartość opałowa paliwa	MJ/kg	37,2	37	43	
Liczba cetanowa	-	34-51	55	min 45	
Skład elementarny	c	kg C/kg pal	0,775	0,76	0,860
	h	kg H/kg pal	0,11	0,125	0.140
	o	kg O/kg pal	0,11	0,11	0.000
	s	kg S/kg pal	0,003	0,001	0,300
Temperatura mętnienia	°C	-4	-5	- 26	
Temperatura zablokowania zimnego filtra	°C	+14	-11	- 30	
Temperatura krzepnięcia	°C	-5	-15	- 40	

Zwraca uwagę duża zawartość tlenu w paliwach rzepakowych, co jest korzystne ze względu na spalanie, gdyż tlen ten cechuje się większą aktywnością niż tlen cząsteczkowy zawarty w powietrzu. Winien więc on sprzyjać intensyfikacji spalania i obniżać zadymienie spalin. Bardzo ważną zaletą tych paliw jest praktycznie zerowa zawartość siarki, co jest korzystną cechą zarówno ze względów ekologicznych, jak i ze względu na korozyjne zużycie elementów silnika.

Wpływ paliw rzepakowych na własności silnika

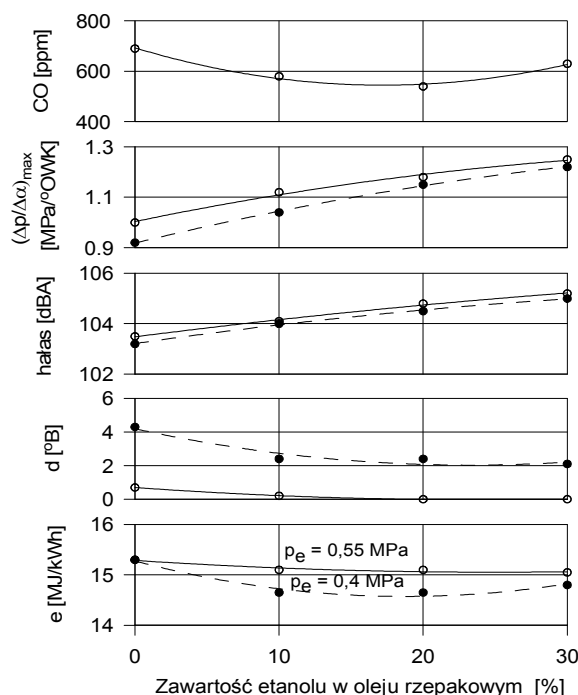
Na rys. 1 pokazano przykładową charakterystykę szybkościową silnika o bezpośrednim wtrysku paliwa, zasilanego olejem napędowym i naturalnym olejem rzepakowym. Zwraca uwagę, że mimo mniejszej o 7% wartości opałowej oleju rzepakowego, moc i moment silnika zasilanego tym paliwem były tylko o ok. 2% niższe niż w przypadku stosowania oleju napędowego. Uzasadniono to wyższą lepkością oleju rzepakowego i dobrymi parametrami wtrysku paliwa dzięki rozdzielaczowej pompie wtryskowej. Sprawność ogólna silnika była o ok. 2% wyższa przy zasilaniu silnika olejem rzepakowym, nie tylko przy pełnym obciążeniu (jak na rys. 1), ale również przy obciążeniach częściowych. Podobne rezultaty stwierdzano na wszystkich badanych silnikach (poprawa sprawności ogólnej do 3%) [5]. Należy jednak uwzględnić, że w warunkach charakterystyki szybkościowej sprawność ogólna jest zdeterminowana w dużym stopniu charakterystyką pompy wtryskowej.



Rys. 1. Charakterystyka szybkościowa silnika o bezpośrednim wtrysku przy zasilaniu silnika olejem napędowym i naturalnym olejem rzepakowym [5]

Dla poprawy warunków spalania oleju rzepakowego badane są możliwości stosowania mieszanin oleju rzepakowego z wodą lub alkoholem. Celem dodawania wody jest powodowanie wybuchowego jej parowania w gorącej komorze spalania, co powinno polepszać proces rozpylania paliwa. Wskazuje się, że korzyści z dodawania wody do oleju roślinnego dla obniżenia zadymienia i tlenków azotu są większe niż przy dodawaniu wody do oleju napędowego. Dodatek alkoholu etylowego do oleju rzepakowego oddziałuje korzystnie na zadymienie spalin, powodując jego obniżenie wskutek dostarczenia do strefy spalania dodatkowego tlenu zawartego w cząsteczce alkoholu. Jednak z powodu wzrostu opóźnienia samozapłonu takiej mieszaniny paliw (mniejsza wartość LC etanolu) zwiększa się ilość ciepła wywią-

zywanego w płomieniu kinetycznym, co skutkuje większym przyrostem ciśnienia spalania, a więc i większym hałasem silnika. Prawdopodobnie łączy się to też ze wzrostem emisji tlenków azotu. Wpływ zawartości alkoholu etylowego na zużycie energii zależy od obciążenia silnika. Wyraźna tendencja spadku jednostkowego zużycia energii (wzrostu sprawności ogólnej) silnika ze zwiększaniem zawartości alkoholu etylowego obserwowana jest w warunkach mniejszych obciążeń. Gdy zawartość alkoholu etylowego przekracza 30%, proces spalania ulega zakłóceniu. Dlatego ze względu na utrzymywanie hałasu silnika na określonym poziomie zawartość alkoholu etylowego w oleju rzepakowym nie powinna przekraczać 20%.



Rys. 2. Wpływ zawartości alkoholu etylowego w oleju rzepakowym na własności silnika o bezpośrednim wtrysku paliwa; $n = 2500$ obr/min [10]

Zasilanie silnika wysokoprężnego estrami metylowymi oleju rzepakowego powoduje duże korzystne obniżenie emisji praktycznie wszystkich toksycznych składników spalin (z wyjątkiem tlenków azotu), co widać wyraźnie w tabeli 4. Zwraca w niej uwagę duży rozrzut wyników dotyczących emisji aldehydów przy zasilaniu silnika estrami metylowymi oleju rzepakowego. Wynika stąd, że emisja tych związków jest wyższa w porównaniu z olejem napędowym. Tak może być podczas pracy silnika z pełnym obciążeniem. Może to być też związane z systemem spalania i warunkami pracy silnika, a także z dokładnością pomiarów tych związków. Duży wpływ może wywierać system wtrysku, gdyż wyższe ciśnienia wtrysku poprawiają rozpylanie paliwa i jego rozprzaskanie w komorze spalania, co prowadzi do pełniejszego spalania wytwarzanych związków.

Z dużą pewnością można natomiast przyjąć, że emisja aldehydów jest większa przy zasilaniu silnika naturalnym olejem rzepakowym niż przy zasilaniu estrami metylowymi tego oleju. Emisja aldehydów z silnika wysokoprężnego zasilanego estrami metylowymi kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego jest znacznie mniejsza niż z silnika benzynowego, a przy częściowym obciążeniu również mniejsza w porównaniu z olejem napędowym. Charakterystyczny zapach pojawiający się ze spalania paliw rzepakowych i związany z obecnością aldehydów w spalinach jest ogólnie odczuwany jako nieprzyjemny, może on być prawie całkowicie eliminowany za pomocą konwertora utleniającego.

Tabela 4. Procentowe zmiany emisji różnych składników spalin silników zasilanych naturalnym olejem rzepakowym lub jego metylowymi estrami w stosunku do zasilania olejem napędowym (ON = 100%) [8]

Składnik spalin	Olej rzepakowy		EMKOR	
Niespalone węglowodory (HC)	210 % 110%	IDI DI	70% 80%	IDI DI
Tlenek węgla (CO)	180% 115%	IDI DI	70-90% 100%	IDI DI
Tlenki azotu (NO _x)	100%		110%	
Cząstki stałe (PM)	320% 90% 80%	IDI (niest.) IDI (stac.) DI	100% 60-80%	DI
Zadymienie spalin	55%		60%	
PAH	10-75% 240%	FTP/13/5 ECE	75% 75% 15%	niest. test 13 faz. test 5 faz.
Aldehydy	280%		120% 400%	FTP-15
Aromaty	135%		60%	
Benzen	160%		70% 135%	

IDI – silnik z komorą dzieloną, DI – silnik z wtryskiem bezpośrednim, niest. – test niestacjonarny, stac. – test stacjonarny, testy 5 i 8 fazowe dotyczą silników ciągników rolniczych

Podsumowanie

Zaprezentowane wyniki wskazują, że spośród biopaliw możliwych do zastosowania w silnikach pojazdów rolniczych najkorzystniejsze właściwości wykazują estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego oraz mieszaniny tych estrów z olejem napędowym. Dalszym krokiem w kierunku wykorzystania surowców rolniczych winno być rozwijanie technologii produkcji estrów etylowych oleju rzepakowego. Zastąpienie metanolu etanolem sprzyjałoby dalszemu obniżeniu zanieczyszczenia środowiska. Takie paliwo można by uznać za całkowicie odnawialne i jednocześnie „zielone”.

Równolegle należałoby prowadzić badania nad wdrażaniem mieszanin naturalnego oleju rzepakowego z olejem napędowym, jako wariantu korzystniejszego z ekonomicznego punktu widzenia.

Piśmiennictwo

1. Egeäck E.-K., Pettersson E.: Research and development of a compression ignition engine fuelled with ethanol. 11th International Symposium on Alcohol Fuels, S. Africa, 14-17 April 96.
2. Ekelund M.: SVENOL – Swedish test with ethanol powered delivery trucks. Status report as of October 25, 1995. Proceedings of the 11th International Symposium on Alcohol Fuels. 14-17 April 96, Sun City, S. Africa.
3. Hansen A. C., Harpe E. R., Dilmitis MM. P.: Ignition-improved ethanol as a fuel for diesel engines. 11th International Symposium on Alcohol Fuels, South Africa, 14-17 April 1996.
4. Hansen A. C., Harpe E. R., Dilmitis MM. P.: Ignition-improved ethanol as a fuel for diesel engines. 11th International Symposium on Alcohol Fuels, South Africa, 14-17 April 1996.
5. Hemmerlein N., Korte V., Richtter H., Schroeder G.: Performance, Exhaust Emissions and Durability of Modern Diesel Engines Running on Rapeseed Oil. SAE Trans. 91 0848
6. Kawambwa S. J. M., Henham A. W. E.: A comparison of spark-ignition and auto-ignition in a small alcohol-fuelled diesel engine. Proceedings of the 11th International Symposium on Alcohol Fuels. 11-17 April 1996, Sun City, South Africa.
7. Kowalewicz A.: Methanol as a fuel for spark ignition engines: a review and analysis. Proc. Instn. Mech. Engrs, 207, 1993.
8. Krah J., Munack A., Bahadir M., Schumacher L., Elser N.: Review: Utilization of Rapeseed Oil, Rapeseed Oil Methyl Ester or Diesel Fuel: Exhaust Gas Emissions and Estimation of Environmental Effects. SAE Transactions, 1996, nr. 96 2096.
9. Merkisz J.: Ekologiczne problemy silników spalinowych. Wyd. Politechniki Poznańskiej. Poznań 1999. Tom 2.
10. Murayama T., Oh.Y., Miyamoto N., Chikahisa T., TakagiN., Itow K.: Low Carbon Flower Buildup, Low Smoke, and Efficient Diesel Operation with Vegetable Oils by Conversion to Mono-Ester and Blending with Diesel Oil or Alcohols. SAE Trans. 84 1161.
11. Szlachta Z.: Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi. WKiŁ, Warszawa 2002.
12. Verweij J., Weide J., Nie L.h., Bruin A.: Demonstration of 3 buses fuelled with ethanol with ignition improver in the Netherlands. Proceedings of the 11th International Symposium on Alcohol Fuels. 14-17 April 1996, Sun City, South Africa.
13. Alcohols in diesel engines: a review. Automotive Engineering, 6, 92, 1984.

Streszczenie

Omówiono niektóre aspekty stosowania biopaliw w silnikach pojazdów rolniczych i wybrane własności alkoholi oraz paliw rzepakowych. Zaprezentowano wpływ takich paliw na wybrane własności silników wysokoprężnych.

Summary

Some aspects the use of biofuel in agricultural vehicle engines as well as chosen properties of alcohols and rapeseed fuels were analyzed. Influence these fuels on selected parameters of diesel engines was presented.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Wiesław Piekarski