

LOTKO Wincenty¹
GÓRSKI Krzysztof¹

BIOPALIWA DO SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

W artykule dokonano przeglądu różnych biopaliw, które można stosować do zasilania silników o zapłonie samoczynnym. Szczególną uwagę poświęcono olejom pochodzenia roślinnego, a także wybranym eterom i alkoholom. Pokazano zarówno wybrane korzyści jak i zagrożenia wynikające z ich zastosowania na cele paliwowe. W pracy wykorzystano wyniki wieloletnich badań, prowadzonych w Instytucie Eksploatacji Pojazdów i Maszyn Politechniki Radomskiej, w zakresie zastosowania paliw alternatywnych do zasilania silników o zapłonie samoczynnym.

BIOFUELS FOR A DIESEL ENGINES

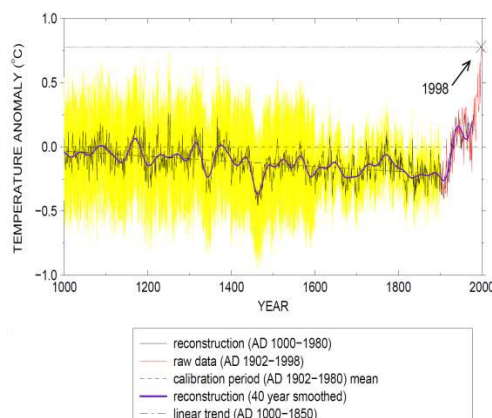
In this paper, a review of different biofuels for powering of a diesel engines have been presented. Particular attention has been focused on plant oils, as well as selected ethers and alcohols. Selected benefits and disadvantages of their use as engine fuels have been presented. In this work the results and experiences of research carried out by Institute of Maintenance of Vehicles and Machines at the Technical University of Radom have been used.

1. WSTĘP

Rozwój gospodarczy, który miał miejsce w XX wieku pozostawał w ścisłym związku z dynamicznym upowszechnieniem różnych środków transportu napędzanych silnikami spalinowymi. Początkowo były one zasilane olejami roślinnymi i alkoholami. Jednak wzrastająca dostępność do tanich zasobów ropy naftowej spowodowała, że jej destylaty skutecznie blokowały rozwój sektora biopaliw silnikowych. Ropa naftowa oraz węgiel stały się podstawowym źródłem energii dla świata, który eksplodował nie tylko przemysłowo, ale także demograficznie. Towarzyszyło temu wzrastające zapotrzebowanie zarówno na paliwa silnikowe, jak i energię elektryczną, które w dalszym ciągu są wytwarzane głównie w oparciu o zasoby pochodzenia mineralnego, takie jak: ropa, gaz i węgiel. Jednak ich spalanie stanowi zagrożenie ekologiczne dla środowiska naturalnego Ziemi. Postępująca świadomość ekologiczna spowodowała, że procesy spalania paliw są nieustannie doskonalone. W związku z tym dąży się do tego, aby budować silniki, które spalając paliwo będą emitować do otoczenia jedynie dwutlenek węgla oraz parę wodną.

¹ Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, IEPiM, 26-600 Radom; ul. Chrobrego 45.
Tel: + 48 48 361-76-59, E-mail: krzysztof.gorski@pr.radom.pl

Jednak w końcu XX wieku opublikowano wyniki badań wskazujące na zagrożenia ekologiczne wynikające z postępującego zjawiska ocieplenia powierzchni Ziemi. Jako przyczynę tego procesu wskazano nadmierną emisję gazów cieplarnianych do otoczenia. Wydaje się, że w tym zakresie największe poruszenie wywołały prace zespołu Michaela E. Manna [13]. Przedstawił on rekonstrukcje zmian temperaturowych Ziemi w ostatnim tysiącleciu. Ten wykres znany pod nazwą „kija hokejowego” wskazuje, że w XX wieku wystąpił gwałtowny wzrost anomalii temperaturowych, których nie stwierdzono we wcześniejszych latach ostatniego tysiąclecia, a nawet jeszcze wcześniej (rys. 1.).

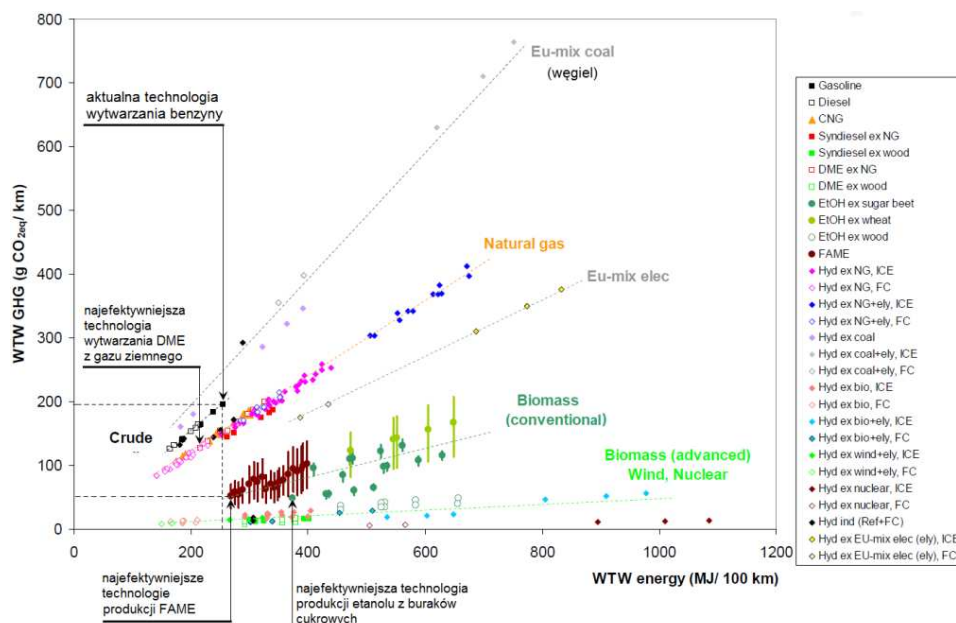


Rys. 1. Przebieg anomalii temperaturowych określonych dla północnej półkuli Ziemi, które występowały na niej w latach 1000 – 1998 [13]

Wśród przyczyn powstawania anomalii temperaturowych i towarzyszących im burzliwych zjawisk pogodowych wskazuje się między innymi emisję gazów cieplarnianych, w tym ze źródeł pochodzących z silników spalinowych. Doskonale ich konstrukcji pozwala ograniczyć tę emisję, ale jej nie zlikwiduje. Dotyczy to w szczególności silników spalinowych zasilanych konwencjonalnie benzyną lub olejem napędowym. Rozpatrując te paliwa w aspekcie ekologicznym, należy uznać je za szkodliwe i dlatego poszukuje się rozwiązań alternatywnych, na które składają się m.in. nowe systemy napędowe zasilane elektrycznie, a także różnymi rodzajami paliw np. wodorem, alkoholami (etanol, metanol), eterami (DME, DEE, ETBE), gazem ziemnym, LPG, olejami roślinnymi i ich estrami.

Silnik o zapłonie samoczynnym może być zasilany różnymi rodzajami paliw pochodzenia mineralnego, roślinnego i syntetycznego. W każdym przypadku ich wyprodukowanie wymaga przeprowadzenia szeregu działań, których zakres wpływa na ostateczny koszt paliwa oraz pozwala ocenić jego faktyczną przyjazność dla środowiska naturalnego. W tym celu prowadzone są określone analizy, które dla potrzeb oceny emisji gazów cieplarnianych biorą pod uwagę nie tylko proces spalania paliwa zachodzący w silniku. Uwzględniają one także szereg innych czynności, które wymagają przetworzenia energii w celu pozyskania surowca do produkcji paliwa, a następnie jego odpowiedniego przetworzenia i dystrybucji. Taka kompleksowa ocena kosztów produkcji paliwa oraz jego ekologiczności jest przedmiotem różnych opracowań. Jednym z obszerniejszych z nich jest raport pt. „Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the

European context”, który został opracowany w 2004 roku przez EUCAR, CONCAWE and JRC (the Joint Research Centre of the EU Commission). Na rysunku 2 przedstawiono emisje gazów cieplarnianych GHG z różnych źródeł, wyrażone w g/km w czasie jazdy pojazdem w warunkach testu NEDC, w zależności od sumarycznej energii (WTW energy) potrzebnej na przejechanie odcinka drogi na dystansie 100 km.



Rys. 2. Emisje gazów cieplarnianych pochodzące z procesu spalania różnych paliw w zależności od energii potrzebnej do jej przetworzenia (analiza WTW - Well to Wheels) [3]

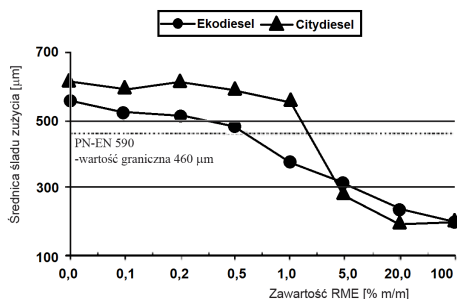
Punktem odniesienia dla analizy rysunku 2 jest emisja gazów cieplarnianych, która występuje przy spalaniu benzyny wytwarzanej wg aktualnie stosowanych procesów technologicznych. Pojazd, który jest zasilany taką benzyną przejeżdża odcinek drogi o długości 100 km emitując do otoczenia około 200 g GHG. Zużywa na to około 250 MJ energii wyznaczonej w analizie WTW. W tym aspekcie wyraźnie korzystniejsze jest spalanie FAME oraz etanolu. Jednak wiąże się to z większym wydatkiem energetycznym, wymaganym do wyprodukowania takich paliw.

Spełnienie przez silniki spalinowe coraz bardziej rygorystycznych norm emisji spalin odbywa się poprzez doskonalenie ich konstrukcji i stosowanie coraz bardziej wyrafinowanych systemów wtrysku paliwa i oczyszczania spalin. Towarzyszą temu odpowiednie zmiany własności fizykochemicznych paliw pochodzenia mineralnego (benzyna, olej napędowy), które w dalszym ciągu pozostają podstawowym źródłem energii dla silników spalinowych. Ponadto to, w wielu ośrodkach badawczych realizowane są różne projekty, których celem jest poszukiwanie alternatywnych, w stosunku do benzyny i oleju napędowego, paliw silnikowych. Takie badania są również prowadzone od wielu lat w Instytucie Eksploatacji Pojazdów i Maszyn Politechniki Radomskiej.

2. CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH PALIW DO SILNIKÓW DIESLA

2.1 Oleje roślinne i ich estry

Oleje roślinne mogą być w określonych warunkach stosowane jako paliwo do zasilania silników o zapłonie samoczynnym. Jednak ich znaczna lepkość powoduje wystąpienie wielu problemów eksploatacyjnych takich silników. W związku z tym oleje roślinne poddaje się procesowi transestryfikacji, co umożliwia uzyskanie biopaliwa (FAME) o parametrach zbliżonych do oleju napędowego. Zastosowanie olejów roślinnych i ich estrów do zasilania silników o zapłonie samoczynnym przynosi określone korzyści ekologiczne, a także ma korzystny wpływ na ograniczenie procesów zużycia węzłów tarcia występujących w elementach aparatury wtryskowej. W badaniach zauważono że niewielki dodatek FAME (RME) do oleju napędowego wyraźnie podnosi smarność otrzymanej mieszaniny paliwowej (rys. 3).

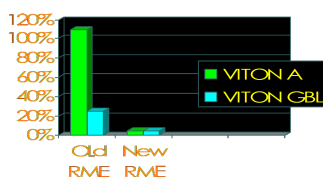


Rys. 3. Wpływ zawartości RME (FAME) na własności smarne HFRR bazowego oleju napędowego Ekodiesel i Citydiesel [15]

Rozważając wady i zalety estrów należy zwrócić uwagę na problem kompatybilności materiałowej z uszczelnieniami silnika. Estry podlegają procesowi utleniania, co zwiększa ich kwasowość i może doprowadzić do przedwczesnego zniszczenia uszczelnienia. Najczęściej są one wykonywane z VITON'u, który jest elastomerem powszechnie stosowanym w technice samochodowej [2]. Występuje on w wielu odmianach, które charakteryzują się różną odpornością na działanie biopaliwa (rys. 4).

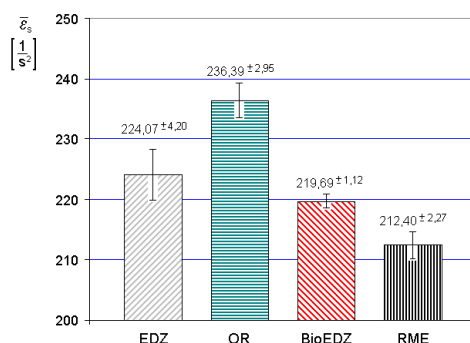
Biodiesel [B100]: Effects on Swelling; Old vs. New

note: these elastomers are stable in petroleum based CARB gasoline and ULSD



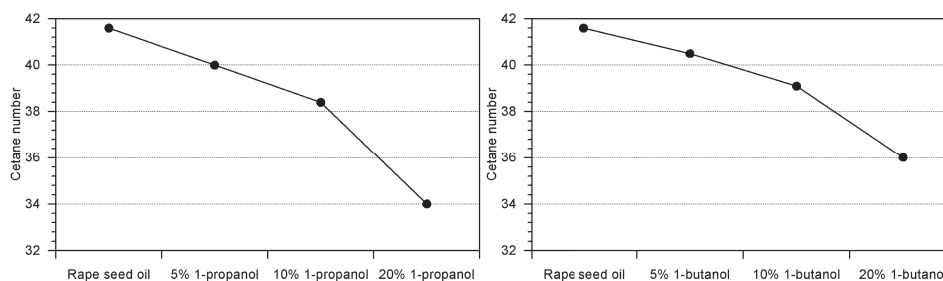
Rys. 4. Wpływ okresu przechowywania biopaliwa na zmianę objętości uszczelek wykonanych z elastomeru Viton w odmianie A oraz GBL (Old RME – RME, którego okres przechowywania wynosi więcej niż ok. 2 miesiące od chwili wyprodukowania, New RME – paliwo tuż po wyprodukowaniu) [Robert Hodam „Biodiesel: Compatibilit and Regulation” National Tanks Conference]

Jak już wspomniano oleje roślinne charakteryzują się wysoką wartością lepkości kinematycznej, co doszczelnia układ wtrysku paliwa. Pomimo niższej, w stosunku do oleju napędowego, wartości opałowej pozwala to poprawić dynamikę procesu przyspieszania wału korbowego silnika (rys. 5), zwiększa jego moc i moment obrotowy.



Rys. 5. Zestawienie wartości średnich przyspieszenia kątownego wału korbowego silnika AD3.152 wyznaczone podczas wykonywania próby przyspieszania jego wału korbowego przy zasilaniu: EDZ – ekodiesel w odmianie zimowej, OR – olej rzepakowy, BioEDZ

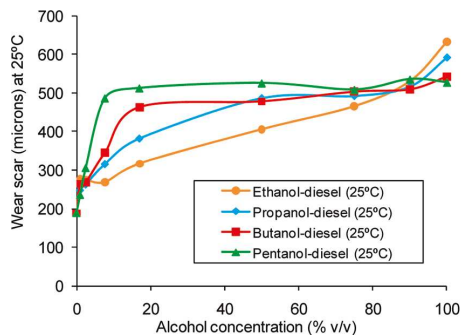
Ważnym parametrem paliwa do silników o zapłonie samoczynnym jest liczba cetanowa (LC). W literaturze można znaleźć różne wartości LC oleju rzepakowego, co zależy głównie od jego odmiany oraz warunków uprawy. Warto zwrócić uwagę, że olej rzepakowy może być mieszany nie tylko z olejem napędowym ale także z wybranymi alkoholami i eterami. Jednak w przypadku alkoholi i niektórych eterów prowadzi to do obniżenia wartości LC (rys. 6).



Rys. 6. Wpływ wybranych alkoholi dodawanych do oleju rzepakowego na zmianę wartości liczby cetanowej otrzymanych mieszanin [8]

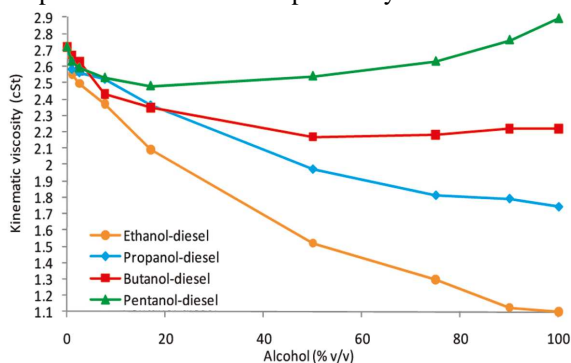
2.2 Alkohole

Najpopularniejszym alkoholem, który może być stosowany do zasilania silników o zapłonie samoczynnym jest etanol. Jednak jego własności fizykochemiczne są w tym aspekcie niekorzystne. Etanol może być mieszany z olejem napędowym, co jednak obniża jego smarność (rys. 7). Ponadto takie mieszaniny mają tendencję do rozwarstwiania – szczególnie pod wpływem wody zawartej w paliwie oraz obniżonej temperatury.



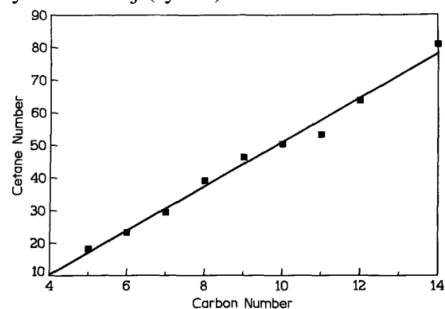
Rys. 7. Wpływ dodatku wybranych alkoholi do oleju napędowego na zmianę smarności otrzymanej mieszaniny (badanie prowadzone w temp. 25 °C) [7]

Etanol mieszany z olejem napędowym obniża również jego lepkość (rys. 8), co będzie sprzyjało zwiększeniu przecieków w układzie paliwowym.



Rys. 8. Wpływ dodatku różnych alkoholi do oleju napędowego na zmianę lepkości kinematycznej otrzymanej mieszaniny [7]

Warto jednak zauważyć, że stosowanie alkoholi o większej liczbie atomów węgla w mieszaninie z ON nie ma już tak ważnego wpływu na zmianę jego lepkości, a dodatkowo sprzyja zwiększeniu liczby cetanowej (rys. 9).



Rys. 9. Wpływ liczby atomów węgla w cząsteczce alkoholi pierwszorzędowych na ich liczbę cetanową: Carbon Number – liczba atomów węgla [4]

Pomimo wielu problemów wynikających z chęci wykorzystania etanolu do zasilania silników o zapłonie samoczynnym jest on w nich już od wielu lat spalany. W Sztokholmie eksploatowanych jest około 600 autobusów firmy SCANIA, które zostały wyposażone w silniki o zapłonie samoczynnym zaadaptowane do zasilania etanolem z niewielką ilością dodatku ułatwiającego samozapłon paliwa. Wydaje się jednak, że korzystne byłoby poszukiwanie także innych rodzajów dodatków tlenowych do oleju napędowego, których zastosowanie mogłoby być uzasadnione ekonomicznie, ekologicznie oraz stanowiło element poprawy bezpieczeństwa energetycznego kraju. Analiza literaturowa tych zagadnień wskazuje na szczególną przydatność pochodnych etanolu oraz niektórych eterów jako paliw dla silników o zapłonie samoczynnym. Zarówno etery, jak i pochodne etanolu pozbawione są cech higroskopijności, dzięki czemu możliwe jest ich mieszanie z olejem napędowym. Uzyskane w taki sposób mieszaniny są jednorodne, stabilne w szerokim zakresie zmian temperatur i nie chłoną wilgoci z otoczenia. Ważną kwestią jest ograniczenie emisji cząstek stałych, które nie powstają w silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym alkoholami lub lekkimi eterami.

2.3 Etery

Etery są substancjami chemicznymi o bardzo zróżnicowanych właściwościach fizykochemicznych. Niektóre z nich, np. dimetylo eter (DME) oraz dietylo eter (DEE), charakteryzują się niewielką gęstością i niską masą cząsteczkową. Natomiast inne jak np. eter metylowy diglikolu (diglyme) mają gęstość większą niż standardowy olej napędowy (Tab. 1).

Tab. 1. Właściwości fizykochemiczne wybranych eterów

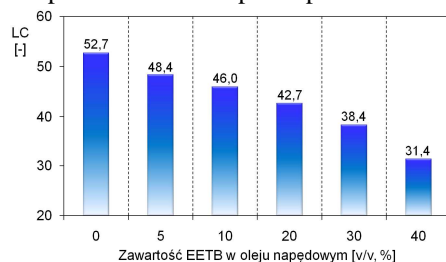
L.p.	Właściwości fizykochemiczne	Nazwa eteru				
		DEE	DME	EETB	Diglyme	DBE
1.	Wzór chemiczny	C ₄ H ₁₀ O	C ₂ H ₆ O	C ₆ H ₁₄ O	C ₆ H ₁₄ O ₃	C ₈ H ₁₈ O
2.	Chemspider ID	3168	7956	11996	7858	8569
3.	Numer CAS	60-29-7	115-10-6	637-92-3	111-96-6	142-96-1
4.	Masa cząsteczkowa, [g/mol]	74,1	46,07	102,18	134	130
5.	Zawartość węgla, [%, m/m]	64,9	52,2	70,53	54	74
6.	Zawartość wodoru, [%, m/m]	13,5	13	13,81	10	14
7.	Zawartość tlenu, [%, m/m]	21,6	34,8	15,66	36	12
8.	Liczba cetanowa	120-140*	55-78*	8	100-210*	91-100*
9.	Temperatura zapłonu, [°C]	-40	<-26	-19	51(70)	25
10.	Temperatura zamarzania, [°C]	-116	-138,5	-94	-64	-95
11.	Temperatura samozapłonu, [°C]	165	235	310	190	185
12.	Temperatura wrzenia, [°C]	34,6	-24,9	72	160	142
14.	Gęstość w temp. 20°C [g/cm ³]	0,71	0,668**	0,745	0,944	0,77

*w zależności od rodzaju zastosowanej metody badawczej

** w stanie ciekłym

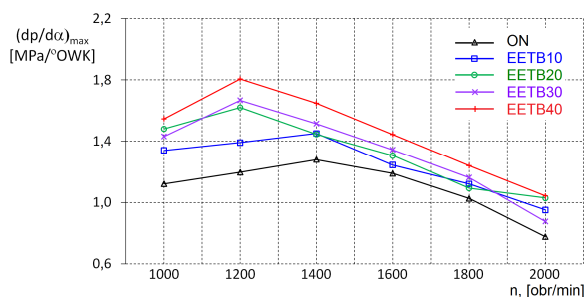
Bibliografia[1, 5, 7, 10, 11, 14 oraz baza danych „chemspider”]

W Polsce popularnym eterem stosowanym na cele paliwowe jest EETB. Produkuje się go z etanolu i izobutyleny. EETB może być również mieszany, w niewielkiej ilości, tj. ok. 10% v/v z olejem napędowym, co pozwala wyraźnie (o ok. 36%) obniżyć emisję cząstek stałych [10]. Jednak dodatek EETB do ON obniża również LC mieszanki (rys. 10), co sprzyja wydłużeniu okresu opóźnienia samozapłonu paliwa.



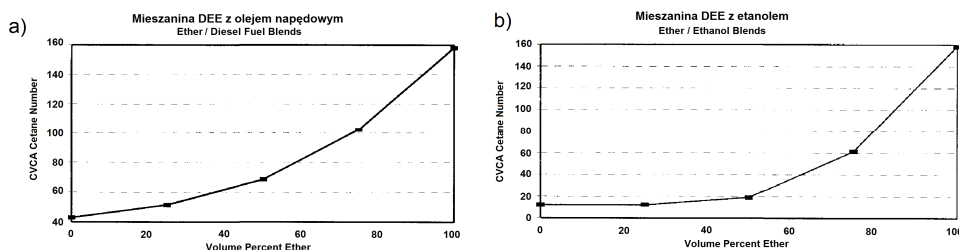
Rys. 10. Wpływ zawartości EETB w ON na LC mieszanki paliwowej

Konsekwencją przedłużającego się okresu przygotowania paliwa do spalania może być nadmierny przyrost ciśnienia w komorze spalania (rys. 11). W związku z tym praca silnika może być nadmiernie twarda, co jest niekorzystne ze względów trwałościowych.



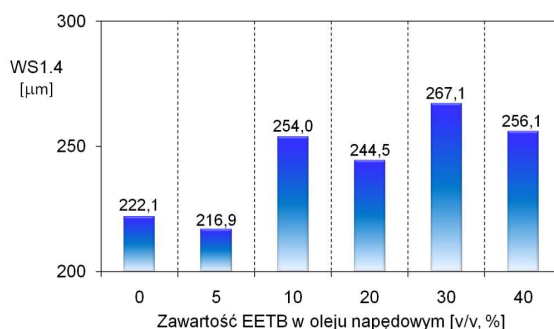
Rys. 11. Zmiany maksymalnej prędkości narastania ciśnienia w komorze spalania silnika AD3.152 pracującego w warunkach charakterystyki zewnętrznej

EETB może być otrzymywany z bioetanolu i dlatego uznaje się go za paliwo odnawialne. Warto jednak zwrócić uwagę, że bioetanol może być wykorzystany do produkcji innego eteru tj. dietylowego, który w porównaniu do EETB charakteryzuje się bardzo wysoką liczbą cetanową (rys. 12).



Rys. 12. Zmiany liczby cetanowej DEE w mieszaninie z: a) ON, b) etanolem [1]

Użycie DEE lub EETB do zasilania silników o zapłonie samoczynnym jest możliwe do zrealizowania, ale może przyczynić się to do intensywniejszego zużycia węzłów tarcia występujących w aparaturze wtryskowej. Świadczą o tym wyniki badań smarności mieszanin EETB z ON, które pokazano na rysunku 13.



Rys. 13. Wpływ zawartości EETB w ON na wartości skorygowanej średnicy zużycia kulki pomiarowej uzyskane w temperaturze 25 °C [11]

Przedstawione wyniki wskazują, że wzrastający udział EETB w ON powoduje pogorszenie własności smarnych badanych mieszanin. W przypadku badań prowadzonych w temperaturze 25 °C wartością graniczną smarności paliwa jest 380 μm [6]. Oznacza to, że wszystkie badane mieszaniny charakteryzowały się wystarczającą smarnością.

3. WNIOSKI

Postępujące wymagania ekologiczne powodują, że następne dekady badań w zakresie doskonalenia układów napędowych pojazdów samochodowych będą realizowane w dwóch podstawowych kierunkach. Pierwszy z nich to popularyzacja pojazdów zasilanych energią elektryczną, a drugi będzie obejmował dalsze doskonalenie silników spalinowych, które będą w coraz szerszym zakresie przystosowywane do zasilania paliwami alternatywnymi, ze szczególnym uwzględnieniem biopaliw drugiej i trzeciej generacji. W ich przypadku należy prowadzić badania obejmujące poszukiwanie efektywnych technologii przetwarzania biomasy – szczególnie tej, która nie jest wykorzystywana przez przemysł spożywczy.

W przypadku silników o zapłonie samoczynnym popularnym biokomponentem do oleju napędowego są estry nienasyconych kwasów tłuszczowych. Ich użycie nie wymaga znacznych modyfikacji silnika i pozwala osiągnąć korzyści ekologiczne. Jednak produkcja FAME jest uzależniona od ograniczonych zasobów surowca, który musi być również wykorzystany na cele spożywcze. W tym aspekcie warto poszukiwać innych biopaliw, które można wytwarzać z odpadów biomasy. Przykładem takiego paliwa jest bioethanol, stosowany jako komponent benzyn silnikowych, a także jako surowiec do produkcji EETB lub DEE. Wszystkie te paliwa można wykorzystać do zasilania silników o zapłonie samoczynnym, co pozwala uzyskać korzyści ekologiczne. Jednak wymaga to wykonania odpowiedniej adaptacji układu zasilania w paliwo, lub realizacji koncepcji dwupaliwowego systemu zasilania silnika. Przykład takich systemów opisano w literaturze [5, 12].

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bailey B., Eberhardt J., Goguen S., Erwin J.: *Diethyl ether (DEE) as a Renewable Diesel Fuel*. 972978. SAE Paper No. 972978.
- [2] DuPont - materiały informacyjne. Numer publikacji: H-82107. *Viton® - Excelling in Modern Automotive Fuel Systems*. DuPont Dow Elastomers. Nr 3/99.
- [3] EUCAR2004 – raport. *Well-To-Wheels Analysis Of Future Automotive Fuels And Powertrains In The European Context*. WTW Report, January 2004.
- [4] Freedman B., Bagby M.O. *Predicting Cetane Number of n-Alcohols and methyl Esters from their Physical Properties*. JAOCS, Vol. 67, no. 9 (September 1990).
- [5] Kowalewicz A., Pajączek Z.: *Dual-Fuel Engine Fuelled with Ethanol and Diesel Fuel*, Journal of KONES, International Combustion Engines, vol. 1-2, Warszawa 2003
- [6] Lacey P.I., Mason R. L.: *Fuel lubricity. Statistical analysis of literature data*. SAE Technical Paper. Ser. 2000, 2000-01-1917.
- [7] Lapuerta M., Garcia-Contreras R., Campos-Fernandez J., Dorado M. P.: *Stability, Lubricity, Viscosity, and Cold-Flow Properties of Alcohol-Diesel Blends*. Energy Fuels 2010, 24, 4497–4502.
- [8] Laza T., Kecskés R., Bereczky A., Penninger A.: *Examination of Burning Processes of Regenerative Liquid Fuel and Alcohol mixtures in Diesel Engine*. Periodica polytechnica ser. Mech. Eng. Vol. 50, no. 1, PP. 11–26 (2006).
- [9] Lotko W., Górski K., Longwic R.: *Nieustalone stany pracy silnika wysokoprężnego zasilanego olejem napędowym z eterem etylo-tert butylowym*. WKiŁ, Warszawa 2010.
- [10] Lotko W. Górski K.: *Zasilanie silnika wysokoprężnego mieszaninami ON i EETB*. WNT 2011.
- [11] Lotko W., Górski K., Przedlacki M.: *Parametry smerności i odporności na zacieranie mieszanin oleju napędowego z eterem etylo-tert butylowym*. Archiwum Motoryzacji Nr 4/2009
- [12] Luft S.: *Dual-Fuel Compression Ignition Engine Fuelled with additional methanol or LPG*. PTNSS Kongres 2005. The development of combustion engines. Szczyrk 2005.
- [13] Mann M. E., Bradley R. S.: *Northern Hemisphere Temperatures During the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations*. AGU GRL galley style, v3.1, 14 Feb 94.
- [14] Murphy M.J., Taylor J.D., McCormick R.L.: *Compendium of Experimental Cetane Number Data*. National Renewable Energy Laboratory. September 2004, NREL/SR-540-36805.
- [15] Oleksiak S., Stępień Z.: *Zagadnienia smerności ciekłych paliw silnikowych*. Czasopismo techniczne „Mechanika”, Z. -7M/2008, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków 2008.