

Wincenty LOTKO  
Krzysztof GÓRSKI  
Robert GIELNIEWSKI

PTNSS–2013–SC–205

## Impact of ETBE addition to diesel oil on variation of engine crankshaft acceleration process

*Abstract: In this paper an impact of ethyl tert-butyl ether (ETBE) addition to diesel oil (DO) on variation of the engine crankshaft acceleration process has been presented. Our tests were performed on a 4-stroke, 3-cylinder, water-cooled, direct-injection AD3.152 diesel engine. The engine was fuelled with DO and with blends of DO with ETBE in volumetric ratio of 10:90, 20:80, 30:70 and 40:60. It was shown that even 40% by vol. of ETBE addition to diesel oil has not significant impact on variation of engine crankshaft acceleration process. It suggests that fuel combustion process occurs properly without a misfire phenomenon caused by low cetane number of ETBE.*

Keywords: ETBE, diesel engine, alternative fuels, engine tests, transient conditions

### Wpływ dodatku EETB do oleju napędowego na zmienność procesu przyspieszania wału korbowego silnika

*Streszczenie: W artykule przedstawiono wpływ dodatku eteru etylo tert-butyłowego (EETB) do oleju napędowego (ON) na zmienność procesu przyspieszania wału korbowego silnika. Badania wykonano na 4-suwowym, 3-cylindrowym, chłodzonym cieczą, z bezpośrednim wtryskiem paliwa silnika diesla AD3.152. Silnik zasilano olejem napędowym i mieszaninami oleju napędowego z EETB w proporcjach objętościowych: 10:90, 20:80, 30:70 i 40:60. Pokazano, że nawet 40% dodatek objętościowy EETB do oleju napędowego nie ma znaczącego wpływu na zmienność procesu przyspieszania wału korbowego silnika. Sugeruje to, że proces spalania paliwa zachodzi prawidłowo bez zjawiska wypadania zapłonów powodowanego niską liczbą cetanową EETB.*

Słowa kluczowe: EETB, silnik diesla, paliwa alternatywne, badania silnika, warunki nieustalone

### 1. Wprowadzenie

Olej napędowy jest w dalszym ciągu podstawowym paliwem dla silników diesla. Jednak własności tego paliwa są sukcesywnie modyfikowane, aby spełnić coraz bardziej rygorystyczne wymagania w zakresie ekologii procesu spalania. Liczne badania dowiodły, że obniżenie emisji szkodliwych składników spalin może być osiągnięte m.in. poprzez wprowadzanie do oleju napędowego dodatków zawierających tlen [1,2]. Aktualnie takim najpopularniejszym dodatkiem są estry metylowe nienasyconych kwasów tłuszczowych (z ang. FAME), a szczególnie te, które są pochodzenia roślinnego. Warto zauważyć, że zgodnie z obowiązującą normą PN:EN 560/2009 do oleju napędowego można dodać do 7% objętościowo FAME i taką mieszaninę wykorzystać do zasilania silników diesla bez negatywnych konsekwencji takiego działania. Ponadto, wskazuje się że takie dodatki wyraźnie poprawiają smarność oleju napędowego, co sprzyja ograniczeniu procesów zużycia węzłów tarcia występujących w aparaturze wtryskowej [3].

Poza olejami roślinnymi i ich estrami, dodatkiem do oleju napędowego mogą być wybrane alkohole i etery. Wiele prac wskazuje na bioetanol jako tanie, ekologiczne i odnawialne paliwo, które można stosować zarówno do zasilania silników o

zapłonie iskrowym jak i samoczynnym. W przypadku silników o zapłonie samoczynnym można to zrealizować w tzw. układzie dwupaliwowym [4] lub jednopaliwowym – tzn. stosując mieszaninę oleju napędowego z etanolem. To drugie rozwiązanie wydaje się bardziej korzystne, gdyż nie wymaga wykonywania istotnych zmian konstrukcyjnych/adaptacyjnych silnika. Jednak jest wiadomym, że etanol charakteryzuje się ograniczoną mieszalnością z olejem napędowym i stosunkowo łatwo dochodzi do separacji faz takiej mieszaniny. Sprzyja temu zarówno spadek temperatury jak i nawet niewielka obecność wody w paliwie [5,6]. W tym aspekcie, inne alkohole o cięższych cząsteczkach, charakteryzują się korzystniejszymi własnościami, lecz są one zazwyczaj droższe w produkcji. W związku z tym zwrócono uwagę na eter etylo tert-butyłowy (EETB), który jest produkowany na masową skalę z etanolu i izobutyleny w obecności odpowiedniego katalizatora. Badania nad tym eterem, jako dodatkiem do ON były już przedmiotem wstępnych badań prowadzonych m.in. w Japonii i Brazylii, a uzyskane rezultaty opublikowano w renomowanych czasopismach [7-9]. Również w Polsce podjęto próbę wykorzystania tego eteru jako komponentu tlenowego do ON. Rezultaty tych badań przedstawiono w publikacjach [10-13]. W przeciwieństwie do etanolu, EETB jest mieszalny z

ON w szerokim zakresie temperatur. Sprawdzono również, że takie mieszaniny nie ulegają rozwarstwieniu pod wpływem wody. Dotychczasowe badania pokazały, że EETB dodawany do ON pozwala wyraźnie ograniczyć emisję większości szkodliwych składników spalin. W szczególności wykazano, że EETB w objętości 10% dodawany do ON pozwala ograniczyć emisję cząstek stałych (PM) o ponad 30% a zadymienie maleje o ok. kilkadziesiąt procent. Jednak podstawowym problemem, który ogranicza zastosowanie EETB jako komponentu ON jest głównie niska liczba cetanowa (LC=8) tego eteru i niska temperatura zapłonu. EETB obniża również smarność ON, chociaż w tym zakresie w dalszym ciągu spełnia on wymagania podane w PN:EN 590 [14]. Warto zwrócić uwagę, że na rynku dostępne są również inne etery o dużych masach cząsteczkowych i własnościach zbliżonych do ON. Jednak zazwyczaj względy ekonomiczne nie pozwalają na ich zastosowanie jako paliwa dla silników diesla. Niektórzy Autorzy wskazują na eter dietylowy (DEE), jako ten który ma szansę stać się dodatkiem tlenowym mieszalnym z ON [15-17]. Wskazują oni na bardzo wysoką LC=125 tego eteru, co predysponuje go do silników diesla.

W niniejszym artykule postanowiono zwrócić szczególną uwagę na EETB, który w mieszaninie z ON wykorzystano do zasilenia silnika AD3.152. Badania wykonano w warunkach swobodnego przyspieszania wału korbowego tego silnika bez jego obciążenia zewnętrznym momentem oporowym. Zastosowana metodyka pomiarowa, w pewnym sensie, odzwierciedla nieustalone warunki pracy silnika, które są szczególnie charakterystyczne dla jego eksploatacji w mieście. Próba rozpędzania jest krótkotrwała i pozwala ocenić wiele parametrów roboczych silnika, w tym zmianę prędkości obrotowej jego wału korbowego w zależności od czasu lub położenia kąтового. Zmienność owej prędkości może być parametrem diagnostycznym przydatnym do wykrywania zaburzeń procesów roboczych silnika. Wykonując serię prób przyspieszeń, niezbędnych dla wykonania analizy statystycznej, można w krótkim czasie wnioskować o tym, czy nowe paliwo w stosunku do standardowego powoduje istotną statystycznie zmienność prędkości obrotowej silnika. Jeśli tak, to musi być to konsekwencją zaburzeń wcześniej występujących procesów tj. wtrysku, a następnie spalania. Wykonanie takich badań wymaga użycia skomplikowanych urządzeń pomiarowych i technik matematycznych analizy sygnałów, a także zachowania ściśle zdefiniowanych parametrów początkowych dla kolejno wykonywanych prób pomiarowych.

## 2. Metody i materiały

### 2.1. Badane paliwa

W badaniach wykorzystano olej napędowy (ON) oraz jego mieszaniny z eterem etylo tert buty-

lowym (EETB). Wybrane własności fizykochemiczne tych paliw przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Wybrane własności fizykochemiczne paliw: ON oraz EETB [10-13]

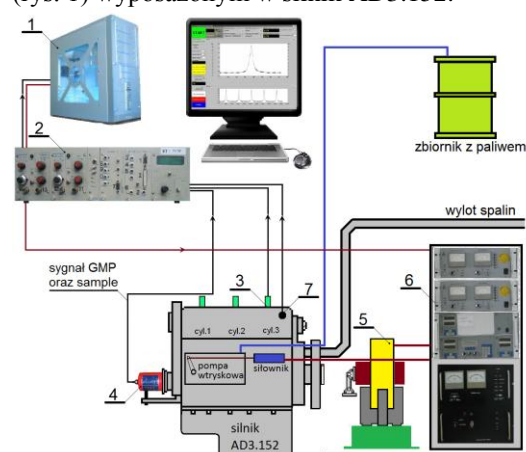
Własność	Oznaczenie paliwa i wartość	
	ON	EETB
Numer CAS	-	637-92-3
Identyfikator Chemspider	-	11996
Wartość opałowa, [MJ/kg]	42,8	36,2
Łepkość, w 25 °C, [mPa·s]	2,74	<1
Gęstość w 20 °C, [g/cm <sup>3</sup> ]	0,836	0,745
Liczba cetanowa, [-]	51,9	8
Zawartość węgla, [%, m/m]	86,3	70,53
Zawartość wodoru, [%, m/m]	13,7	13,81
Zawartość tlenu, [%, m/m]	-	15,66
Masa cząsteczkowa, [g/mol]	-	102,18
Smarność [µm]	447	-

Analizując własności EETB, które pokazano w tab. 1, na uwagę zasługuje jego niska LC. W związku z tym EETB obniża wartość LC oleju napędowego, co powoduje wzrost kąta opóźnienia samozapłonu i twardszą pracę silnika [10-13]. W skrajnych przypadkach może dochodzić do zaburzeń procesu spalania czego symptomem jest większa zmienność prędkości obrotowej wału korbowego silnika. Ocena owej zmienności jest powszechnie stosowana do wykrywania zjawiska wypadania zapłonów w silnikach spalinowych.

Wykorzystując EETB i ON przygotowano ich mieszaniny o następujących proporcjach objętościowych: 10:90, 20:80, 30:70 i 40:60. Tak otrzymane mieszaniny oznaczono: EETB10, EETB20, EETB30 i EETB40. Dla przykładu paliwo EETB10 zawierało objętościowo 10% EETB oraz 90% ON.

### 2.2. Stanowisko badawcze

Badania wykonano na stanowisku testowym (rys. 1) wyposażonym w silnik AD3.152.



Rys. 1. Widok stanowiska badawczego: 1 – stacja robocza z kartą pomiarową Keithley KPCI 3110, 2 – wzmacniacz sygnałów, 3 – czujnik ciśnienia AVL QC34D, 4 – przetwornik obrotowo-impulsowy, 5 – hamulec silnikowy, 6 – szafa sterownicza,

Jest to silnik starszej konstrukcji, który wyposażono w rozdzielaczową pompę wtryskową paliwa oraz wtryskiwacze wielootworowe. Silnik badano dla

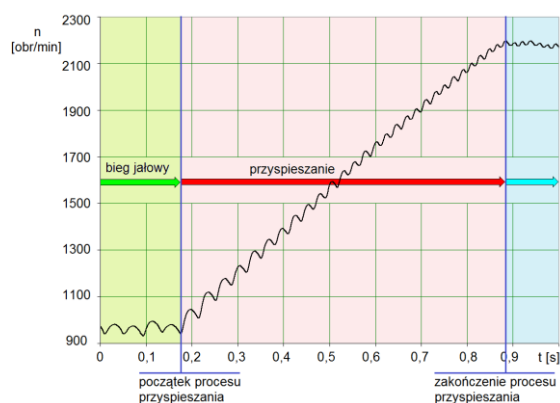
jego nominalnej regulacji aparatury wtryskowej paliwa. Wybrane dane techniczne badanego silnika przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Podstawowe dane techniczne silnika AD3.152

Nazwa parametru	Wartość
Liczba cylindrów	3
Kolejność zapłonów	1-2-3
Maksymalna moc	34,5 kW / 2200obr/min
Maksymalny moment obrotowy	165 Nm / 1300obr/min
Stopień sprężania	16,5
Ciśnienie otwarcia wtryskiwacza	15,5 MPa
Rodzaj pompy wtryskowej	Lucas DPA
Rodzaj systemu wtrysku paliwa	bezpośredni
Nominalny kąt wyprzedzenia wtrysku	17 °OWK przed GMP

### 2.3. Metoda pomiarowa

Badania wykonano stosując metodę „przyspieszeń”, w której wał korbowy silnika jest gwałtownie rozpędzany od prędkości obrotowej biegu jałowego do maksymalnej (rys. 1).

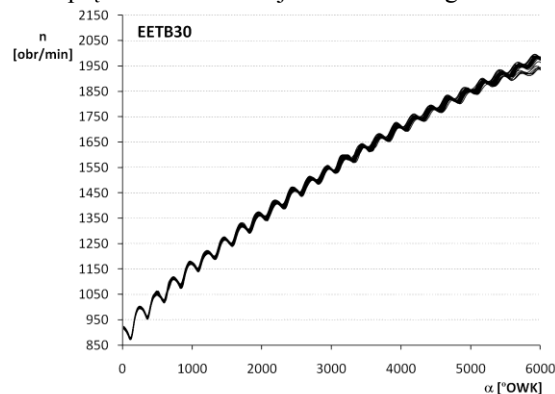


Rys. 2. Zmiany prędkości obrotowej wału korbowego silnika AD3.152 podczas wykonywania próby jego przyspieszania (uwaga: wykres przedstawia zmiany prędkości wału w zależności od czasu)

Zaletą zastosowanej metody jest krótki okres jej realizacji, co ma wpływ na ograniczenie kosztów prowadzonych testów, a jednocześnie pozwala ocenić procesy robocze silnika pracującego w warunkach jego maksymalnego obciążenia bez konieczności zastosowania zewnętrznego hamulca.

System pomiarowy wyposażono w algorytm kontrolujący położenie dźwigni sterującej dawkowaniem pompy wtryskowej paliwa. Dzięki temu uzyskano skokową zmianę jej dawkowania od wartości niezbędnej dla pracy silnika na biegu jałowym do wartości przy której silnik uzyskuje prędkość maksymalną. Opisany proces odbywa się automatycznie za pomocą odpowiedniego siłownika sterowanego przez komputer. Zautomatyzowana procedura pomiarowa wymaga od operatora systemu jedynie, aby nacisnął on przycisk „START” znajdujący się na pulpicie komputera. Następnie system oczekuje na sygnał GMP z badanego cylindra, a po jego uzyskaniu gwałtownie zwiększa dawkę paliwa wtryskiwanego do cylindrów. Silnik w odpowiedzi na takie wymuszenie gwałtownie przyspiesza aż do

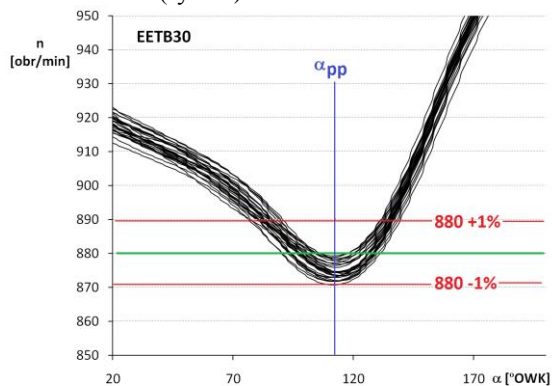
osiągnięcia prędkości maksymalnej. W tym okresie rejestrowane są kolejne cykle robocze silnika, niezbędne dla analizy jego parametrów pracy. Dla każdego rodzaju badanego paliwa wykonano 25 prób przyspieszania (rys. 3), co jest wystarczającą liczbą dla oceny statystycznej analizowanej zmienności prędkości obrotowej wału korbowego.



Rys. 3. Przebiegi  $n(\alpha)$  uzyskane dla 25 kolejno wykonywanych prób przyspieszania wału korbowego silnika AD3.152 zasilanego paliwem EETB30

Dla tak zgromadzonej próby wyznaczono odchylenia standardowe i wartość średnią zmian prędkości obrotowej wału korbowego w zależności od zmian jego położenia kąowego ze skokiem co 0,8 °OWK (rys. 4). Dzieląc wartość odchylenia standardowego przez średnią ocenianego parametru uzyskano wartość jego wskaźnika zmienności [18].

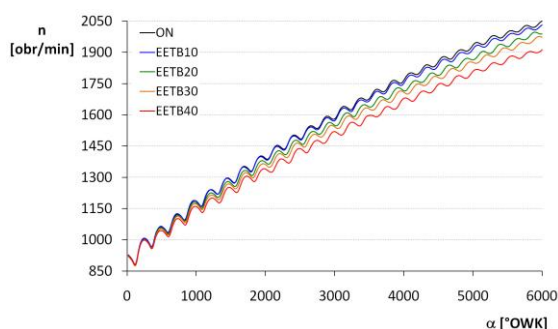
Na potrzeby realizacji badań opracowano system synchronizacji chwili początku próby przyspieszania wału korbowego z położeniem GMP tłoka w badanym cylindrze. Dzięki temu uzyskano wysoką powtarzalność parametrów początkowych pomiaru. Jest to ważne, gdyż powtarzalność warunków początkowych pomiaru ma wpływ na powtarzalność realizacji całej próby przyspieszania. Dlatego przyjęto, że rozrzut prędkości początkowej  $n=880$  obr/min, od której rozpoczynano próbę przyspieszania wału korbowego silnika, nie będzie przekraczał wartości  $\pm 1\%$  (rys. 4.).



Rys. 4. Przebiegi  $n(\alpha)$  uzyskane w 25 kolejno wykonywanych próbach przyspieszania wału korbowego silnika AD3.152:  $\alpha_{pp}$  – położenie kąowe wału przy którym rozpoczyna się proces jego swobodnego przyspieszania

### 3. Wyniki badań

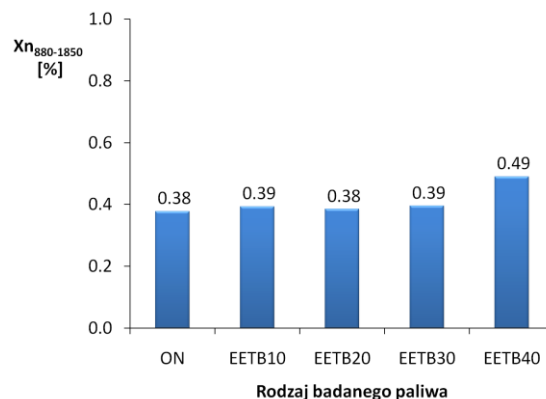
Na rysunku 5 pokazano zestawienie zbiorcze  $n(\alpha)$ , uśrednione z 25 prób, które uzyskano dla przyspieszającego silnika zasilanego testowanymi paliwami.



Rys. 5. Zmiany prędkości obrotowej wału korbowego silnika AD3.152, zasilanego testowanymi paliwami, w zależności od położenia kąowego jego wału korbowego

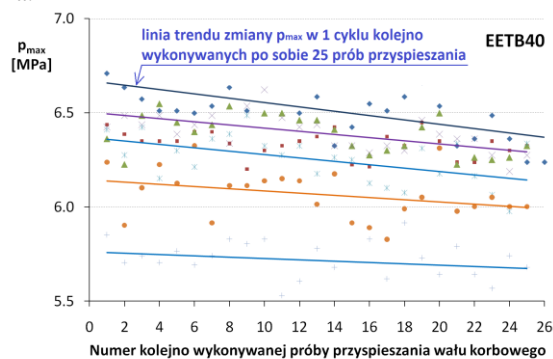
Rysunek 5 pokazuje, że rosnąca ilość EETB dodawanego do ON powodowała, że proces przyspieszania wału korbowego badanego silnika stawał się coraz mniej dynamiczny. Jest to spowodowane przede wszystkim niższą wartością opałową EETB w stosunku do ON (z. Tab. 1). W takim przypadku, aby poprawić dynamikę silnika należałoby zwiększyć objętościową dawkę paliwa tłoczonego przez sekcję pompy do wtryskiwaczy, a następnie rozpylanego w komorze spalania.

Uzyskane przebiegi  $n(\alpha)$  jednoznacznie pokazują jaki jest wpływ EETB dodawanego do ON na dynamikę procesu przyspieszania testowanego silnika. Jednak nie pozwalają one ocenić, czy zachodzące w nim procesy robocze przebiegają prawidłowo. Jakikolwiek zaburzenia procesu wtrysku ON zawierającego EETB, a następnie mogące wystąpić nieprawidłowości spalania takiej mieszaniny muszą wpływać na większe zaburzenia zmian prędkości obrotowej wału korbowego w przyspieszającym silniku. Miarą tych zaburzeń może być wskaźnik zmienności prędkości obrotowej silnika. Jego wartość  $X_{n_{880-1850}}$  wyznaczono dla każdego paliwa, którym był zasilany testowany silnik. Wskaźniki  $X_{n_{880-1850}}$  wyznaczono dla przyrostu prędkości obrotowej silnika AD3.152 w zakresie 880-1850 obr/min. Powyżej 1850 obr/min dawka paliwa tłoczonego przez pompę wtryskową ulega zmniejszeniu przez zadziałanie mechanicznego regulatora. W badaniach stwierdzono, że jego praca jest wysoce niepowtarzalna. W związku z tym zdecydowano się analizować ten zakres zmienności prędkości obrotowej wału korbowego, który nie jest zakłócony działaniem regulatora, a wynika on jedynie z procesów roboczych wtrysku i spalania testowanych paliw. Uzyskane wyniki pokazano na rysunku 6.



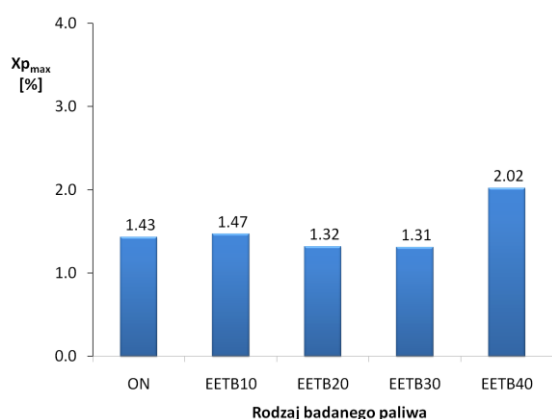
Rys. 6. Zmiany wskaźnika zmienności prędkości obrotowej silnika AD3.152 zasilanego testowanymi paliwami

Otrzymane rezultaty jednoznacznie wskazują, że proces przyspieszania wału korbowego silnika AD3.152 zasilanego ON zawierającym do 30% dodatku EETB zachodzi z taką samą i jednocześnie niską (poniżej 0,4%) zmiennością. Oznacza to, że EETB dodawany do ON nie zaburza realizację procesów roboczych występujących w silniku. Jednak zauważono, że dla paliwa EETB40 wartość wskaźnika  $X_{n_{880-1850}} = 0,49$  jest większa w porównaniu do jego wartości wyznaczonych dla pozostałych, badanych paliw. Aby ocenić przyczynę wzrostu wartości analizowanego wskaźnika wykonano analizę zmian maksymalnych ciśnień  $p_{max}$  zarejestrowanych w komorze spalania w kolejno wykonywanych próbach przyspieszania silnika. Otrzymane rezultaty przedstawiono na rysunku 7. Pokazano na nim kolorowe linie, które wskazują przykładowe trendy zmian wartości  $p_{max}$  w wybranych cyklach procesu spalania dla kolejno wykonywanych po sobie prób przyspieszania badanego silnika.



Rys. 7. Zmiany maksymalnych wartości ciśnienia zarejestrowanych w komorze spalania silnika AD3.152 w 25 kolejno wykonywanych po sobie próbach przyspieszania

Rysunek 7 jednoznacznie wyjaśnia że wzrost wartości wskaźnika  $X_{n_{880-1850}}$ , zaobserwowany przy zasilaniu silnika AD3.152 paliwem EETB40 wynika z tego, że w kolejno wykonywanej próbie przyspieszenia nieznacznie malała wartość maksymalna ciśnień w komorze spalania. Zmienność tego parametru w zależności od rodzaju badanego paliwa pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Zmiany wskaźnika zmienności  $p_{max}$  uzyskane dla silnika AD3.152 zasilanego testowanymi paliwami

Rysunek 8 czytelnie pokazuje, że zmienność  $p_{max}$  wyznaczona dla paliw: ON, EETB10, EETB20 i EETB30 jest porównywalna. Natomiast w przypadku paliwa EETB40 ulega ona wyraźnemu zwiększeniu. Na obecnym etapie badań nie udało się ustalić czym było to spowodowane. Być może było to związane z postępującą zmianą stanu termicznego lub technicznego silnika lub nieoczekiwaną zmianą warunków fizycznych otoczenia, która mogła wystąpić w czasie wykonywania precyzyjnych pomiarów. Niezależnie od przyczyny opisanego stanu rzeczy, ocena zmian wartości wskaźnika  $X_{n_{880-1850}}$  pozwoliła wykryć nawet niewielkie zaburzenia procesu przyspieszania wału korbowego testowanego silnika. W związku z tym może być on wykorzystany jako parametr diagnostyczny, przydatny w ocenie jakości prowadzonych badań silnikowych.

Należy zauważyć, że wskaźnik zmienności jest szczególnie „wrażliwy” na stochastyczne zaburzenia procesu roboczego. Źródłem tych zaburzeń mogą być różne czynniki związane bezpośrednio z silnikiem lub jego otoczeniem (tzw. czynniki pochodzenia wewnętrznego jak i zewnętrznego). W oparciu o zgromadzone doświadczenia można postawić tezę, że właściwości fizykochemiczne bada-

nych paliw oczywiście wpływają na wartości parametrów roboczych silnika, ale owe właściwości nie oddziałują na zmienność tych parametrów o ile nie będą one zakłócone zdarzeniami o charakterze przypadkowym. Oznacza to np. że zastosowanie paliwa o mniejszej liczbie opalowej spowoduje zwiększenie czasu przyspieszania wału korbowego silnika, ale taki proces będzie statystycznie tak samo zmienny jak w przypadku zastosowania paliwa o większej wartości opalowej. Podobnie zastosowanie paliwa o większej lepkości powinno zwiększać ciśnienia wtrysku, ale zmienność tego ciśnienia będzie taka sama jak dla paliwa mniej lepkiego, o ile proces wtrysku nie zostanie zakłócony zdarzeniem stochastycznym.

Kwestie związane z badaniem zmienności procesów roboczych silnika są trudne w analizie, gdyż do ich badań wymagane jest zachowanie szczególnej staranności w wykonywaniu pomiarów i dalszym przetwarzaniu uzyskanych danych przy użyciu złożonych metod numerycznych.

Problem, który poruszono w niniejszym artykule będzie w dalszym ciągu badany, a postawiona teza zweryfikowana.

### Podsumowanie i wnioski

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań nad wykorzystaniem EETB w mieszaninie z ON do zasilania silnika diesla. Przeprowadzone testy dotyczyły oceny zmienności prędkości obrotowej wału korbowego w warunkach jego swobodnego przyspieszania od prędkości obrotowej biegu jałowego do maksymalnej. W oparciu o przeprowadzoną analizę zmian tego parametru zauważono, że dodatek EETB do ON nie zwiększa wartości wskaźnika zmienności. Dla wszystkich badanych paliw (poza EETB40) zmienność prędkości obrotowej silnika jest na porównywalnie niskim poziomie. Wskazuje to, że dodatek EETB do ON nie wpływa na zmienność procesów roboczych zachodzących w badanym silniku, które mogłyby być zakłócone zjawiskami o charakterze stochastycznym.

### Nomenclature/Skróty i oznaczenia

EETB Ethyl tert-butyl ether/*eter etylo tert-butyłowy*  
 DEE Eter dietyłowy/*diethyl ether*  
 LC Liczba cetanova/*cetane number*  
 ON Diesel oil/*olej napędowy*

n prędkość obrotowa/*rotational speed*  
 $\alpha$  położenie kątowe wału korbowego/*crankshaft angle position*  
 GMP Górne martwe położenie tłoka/*Top dead center*

### Bibliography/Literatura

[1] Ahmed J. Oxygenated diesel: emissions and performance characteristics of ethanol-diesel blends in CI engines. SAE paper 2001-01-2475.

[2] Bertola A, Boulouchos K. Oxygenated fuels for particulate emissions reduction in heavy-duty DI-diesel engines with common-rail fuel injection. SAE Paper 2000-01-2885.

- [3] Batko B., Dobek T.K. Ocena właściwości smarnych wybranych paliw pochodzenia roślinnego i naftowego. *Inżynieria Rolnicza* 4(102)/2008, p. 69-74.
- [4] Luft S.: Dwupaliwowy silnik o zapłonie samoczynnym zasilany mieszaniną gazów propan-butan (LPG) i olejem napędowym. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Monografia Nr 54, 2002.
- [5] Kwanchareon P, Luengnaruemitchai A, Jai-In S. Solubility of a diesel-biodiesel-ethanol blend, its fuel properties, and its emission characteristics from a diesel engine. *Fuel* 2007;86:1053-61.
- [6] Lapuerta M, Garcia-Contreras R, Campos-Fernandez J, Dorado MP. Stability, lubricity, viscosity, and cold-flow properties of alcohol-diesel blends. *Energy Fuels* 2010;24:4497-502.
- [7] De Menezes EW, Silva R, Cataluña R, Ortega RJC. Effect of ethers and ether/ethanol additives on the physicochemical properties of diesel fuel and on engine tests. *Fuel* 2006;85:815-22.
- [8] Li T, Suzuki M, Ogawa H. Effects of ethyl tert-butyl ether addition to diesel fuel on characteristics of combustion and exhaust emissions of diesel engines. *Fuel* 2009;88:2017-24.
- [9] Yee, K.F., Mohamed, A.R., Tan, S.H: A review on the evolution of ethyl tert-butyl ether (ETBE) and its future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 22, 2013, p. 604-620.
- [10] Lotko W., Górski K., Longwic R.: Nieustalone stany pracy silnika wysokoprężnego zasilanego olejem napędowym z eterem etylo – tert butylovym. Warszawa, WKiŁ 2010.
- [11] Lotko W. Górski K.: Zasilanie silnika wysokoprężnego mieszaninami ON i EETB. WNT. Warszawa 2011.
- [12] Górski K., Asok K. Sen, Lotko W., Swat M.: Effects of ethyl-tert-butyl ether addition on the physicochemical properties of diesel oil and particulate matter and smoke emissions from diesel engines. *FUEL*. Vol 103/2013, p. 1138-1143. Elsevier 2012.
- [13] Górski K., Asok K. Sen: Impact of Ethyl-Tert-Butyl Ether (ETBE) Addition to Diesel Oil on Engine Knock. Rozdział w monografii pt. Diesel Fuels: Characteristics, Performances and Environmental Impacts. Praca pod redakcją Cristobal Silva and Agustin Rivera. Nova Science Publishers USA, 2013.
- [14] European standard EN 590:2006, Automotive fuels – Diesel – Requirements and test methods, European Committee for Standardization. Brussels 2006.
- [15] Bailey B, Eberhardt J, Goguen S, Erwin J. Diethyl Ether as a Renewable Diesel Fuel. SAE Paper 972978.
- [16] Rakopoulos DC, Rakopoulos CD, Giakoumis EG, Dimaratos AM. Characteristics of performance and emissions in high-speed direct injection diesel engine fueled with diethyl ether/diesel fuel blends. *Energy* 2012;43:214-224.
- [17] Iranmanesh M, Subrahmanyam JP, Babu MKG. Potential of Diethyl Ether as a Blended Supplementary Oxygenated Fuel with Biodiesel to Improve Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engines. SAE Paper 2008-01-1805.
- [18] Heywood J. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw Hill Co., N.Y. 1988.

Mr Wincenty Lotko, Prof. DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Mechanical Engineering at Kazimierz Pulaski University of Technology and Humanities. *Prof. dr hab. inż. Wincenty Lotko – profesor zwyczajny na Wydziale Mechanicznym UTH Radom.*



Mr Robert Gielniewski, Eng. – PhD student in the Faculty of Mechanical Engineering at Kazimierz Pulaski University of Technology and Humanities. *Mgr inż. Robert Gielniewski – doktorant na Wydziale Mechanicznym UTH Radom*



Mr Krzysztof Górski, PhD., MEng. – assistant professor the Faculty of Mechanical Engineering at Kazimierz Pulaski University of Technology and Humanities. *Dr inż. Krzysztof Górski – adiunkt na Wydziale Mechanicznym UTH Radom.*

