

Wpływ parametrów paliwa na niepowtarzalność procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.442
Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

W artykule skupiono się na analizie wskaźnika niepowtarzalności wybranych parametrów spalania w silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym olejem napędowym (ON) w mieszaninie z eterem etylo tert-butylowym (EETB). Niezbędne badania wykonano w warunkach swobodnego przyspieszania wału korbowego silnika, nieobciążonego zewnętrznym momentem oporowym. Uzyskane rezultaty wskazują, że EETB dodawany do ON nie ma znaczącego wpływu na zmianę niepowtarzalności procesu spalania w badanym silniku.

Słowa kluczowe: EETB, silnik diesla, paliwa alternatywne, mieszaniny paliwowe.

Wstęp

W wielu krajach obserwuje się wzrost zainteresowania paliwami alternatywnymi do silników spalinowych. Ma to uzasadnienie nie tylko ekologiczne, geopolityczne ale również ekonomiczne. Biorąc to pod uwagę w wielu światowych ośrodkach badawczo - rozwojowych prowadzone są prace nad zastosowaniem tzw. dodatków tlenowych pochodzenia roślinnego jako komponentów paliw do silników o ZS. Wykazano, że może to mieć korzystny wpływ na procesy robocze silnika i sprzyjać poprawie ochrony środowiska naturalnego przed wpływem szkodliwych produktów procesu spalania.

Istnieją również korzyści wynikające z dywersyfikacji źródeł energii oraz stymulacji w zakresie upraw rolniczych i gospodarki odpadami. Ponadto, dotychczasowe wyniki badań krajowych i zagranicznych wskazują na korzyści wynikające z zastosowania etanolu do silników o ZS (SCANIA w autobusach w Sztokholmie). Istnieje także zainteresowanie innymi dodatkami tlenowymi do oleju napędowego w postaci wybranych eterów jak np. eter etylo-tert butylowy (EETB), eter dimetylowy (DME) oraz eter dietylowy (DEE). Jedną z ich istotnych cech jest niska polarność, co sprzyja bardzo dobrej mieszalności z olejem napędowym jak również olejami roślinnymi i ich pochodnymi.

1 Niepowtarzalność procesów roboczych silnika

Zagadnienie niepowtarzalności ma charakter stochastyczny i niedeterministyczny, a obie te cechy są wpisane w jego nazwę. Stochastyczność oznacza występowanie czynnika losowego, który wpływa na mierzoną wartość. Poszukiwanie zależności funkcyjnych wymaga więc uwzględnienia tego czynnika. Zjawiska stochastyczne można uchwycić z wykorzystaniem narzędzi uwzględniających rozkłady prawdopodobieństwa badanych wartości, wybór narzędzi statystycznych opisany jest w pozycjach literaturowych [1, 2, 3].

Natomiast niedeterministyczny charakter zjawiska oznacza, że jego rezultat, czy też uzyskane wartości parametru mogą różnić się mimo faktu, że warunki początkowe były identyczne. Tak więc warunki wyjściowe, czy przyjęte założenia nie pozwalają jedno-

znacznie wnioskować co do wyniku badania, a badania przeprowadzone w tych samych warunkach mogą prowadzić do uzyskania różnych wyników. Także w tym przypadku uprawnione wnioskowanie jest możliwe przy wykorzystaniu aparatu statystycznego.

Niepowtarzalność, podobnie jak odchylenie standardowe lub wariancja jest jednym z podstawowych parametrów statystycznych, wykorzystywanym do scharakteryzowania zmienności analizowanego zbioru danych pomiarowych. Istnieje wiele opracowań, w których opisano cechy tych charakterystyk statystycznych [1, 2, 3]. W przypadku niepowtarzalności wybranego parametru jego wartość można obliczyć korzystając ze wzoru 1.

$$X_A = \frac{\sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (A_i - A_{sr})^2}}{A_{sr}} = \frac{\sigma_i}{A_i} \quad (1)$$

gdzie:

- X – wskaźnik niepowtarzalności parametru A,
- A_i – wartość parametru w i -tym cyklu,
- A_{sr} – średnia arytmetyczna i -tego parametru w k cyklach,
- k – liczba cykli,
- i – kolejny numer cyklu,
- σ_i – odchylenie standardowe parametru A.

W najprostszym rozumieniu niepowtarzalność jest stosunkiem odchylenia standardowego analizowanego parametru do jego wartości średniej, obliczonej ze zbioru uzyskanych danych pomiarowych.

2 Charakterystyka pracy silnika w warunkach jego przyspieszania

Badania silników spalinowych przeprowadza się przeważnie w warunkach ustalonych stanów ich pracy. Jednakże od pewnego czasu rozwijają się badania silnika spalinowego także w warunkach dynamicznych. Wynika to z tego, że praca silnika spalinowego w pojeździe trakcyjnym odbywa się przeważnie w warunkach dynamicznych. Uregulowania prawne dotyczące kontroli poziomu emisji składników toksycznych spalin w warunkach dynamicznych spowodowały znaczny wzrost zainteresowaniem tą tematyką.

Warunki dynamiczne pracy silnika spalinowego można podzielić na ustalone i nieustalone. Jednym z przykładów procesu nieustalonego jest swobodne rozpędzanie silnika. W takich warunkach zmienna jest nie tylko prędkość obrotowa jego wału korbowego, ale również obciążenie, stan cieplny oraz natężenia przepływu czynnik roboczych [4, 5]. Do uproszczonego opisu tego procesu można zastosować poniższe równanie:

$$\frac{d}{dt}(J \cdot \omega) = M_i - M_m - M_{op} \quad (2)$$

gdzie:

- M_i – moment obrotowy indykowany,
- M_m – moment obrotowy strat wewnętrznych,

- M_{op} - zewnętrzny moment obrotowy obciążający silnik,
- J - masowy moment bezwładności ruchomych części silnika sprowadzony na oś wału korbowego,
- ω - prędkość kątowna wału korbowego silnika,
- α - kąt obrotu wału korbowego,
- t - czas.

Elementami równania (2) są: M_i , M_m oraz M_{op} opisane zależnościami (3), (4) oraz (5):

$$M_i = f[\omega, h] \quad (3)$$

gdzie:

h - położenie elementu sterującego dawką paliwa.

$$M_m = g[\omega] \quad (4)$$

Moment obrotowy obciążający silnik, równy w warunkach stacjonarnych momentowi obrotowemu użytecznemu M_o , może być modelowany jako zależność funkcyjna:

$$M_{op} = p[\omega, h] \quad (5)$$

Jednak w warunkach rzeczywistego użytkowania silnika spalynowego przyjmuje się założenie, że [5]:

$$\left(\frac{dJ}{d\alpha}\right) = 0 \quad (6)$$

W związku z tym równanie 2 można uprościć do postaci:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_i - M_m - M_{op} \quad (7)$$

Natomiast dla silnika spalinowego nieobciążonego zewnątrz można przyjąć:

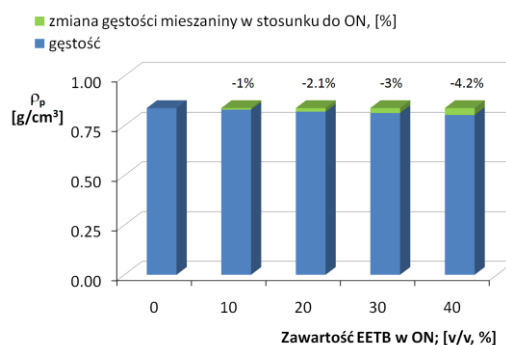
$$M_o = M_i - M_m = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = f[\omega, h] - g(\omega) \quad (8)$$

Taki stan pracy silnika z zapłonem samoczynnym jest uzyskiwany zmieniając położenie dźwigni dawkującej paliwo z położenia minimalnego w maksymalne. Aby zachować porównywalne warunki początkowe tego procesu opracowano elektroniczny układ sterowania pracą pompy wtryskowej paliwa. Układ synchronizuje proces gwałtownego zwiększenia dawkowania paliwa przez pompę z górnym martwym położeniem tłoka w pierwszym cylindrze.

3 Własności fizykochemiczne badanych mieszanin paliw

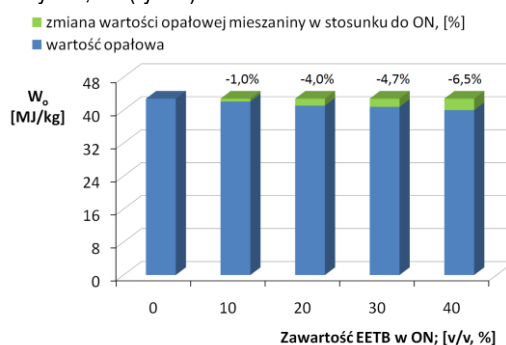
Na podstawie przeprowadzonych badań zauważono, że dodanie EETB do ON ma zróżnicowany wpływ na analizowane właściwości fizykochemiczne otrzymanych mieszanin. Zdecydowanie najmniejszy wpływ miał dodatek EETB na zmianę gęstości oleju napędowego. Malala ona o ok. 1% przy każdym 10% (v/v) dodatku EETB do ON (rys. 1).

- obniżenie gęstości paliwa o ok. 1% (rys. 1),
- zmniejszenie lepkości kinematycznej paliwa o ok. 14%,
- spadek napięcia powierzchniowego o ok. 5%,
- obniżenie wartości opałowej o ok. 1,6%,
- zmniejszenie liczby cetanowej o ok. 10%.



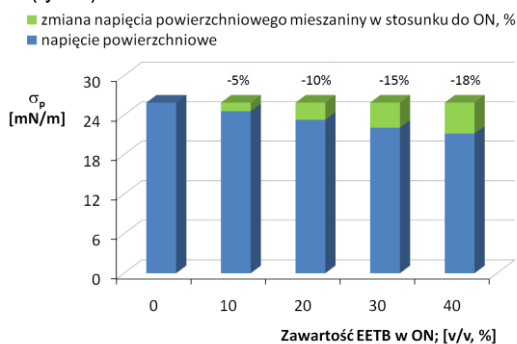
Rys. 1. Wpływ udziału (v/v) EETB w mieszaninie z ON na gęstość w 15 °C

Dodatek EETB ma również niewielki wpływ na zmianę wartości opałowej oleju napędowego. Dodanie 40% objętościowo EETB do ON powoduje obniżenie wartości opałowej otrzymanej w ten sposób mieszaniny o 6,5% (rys. 2).



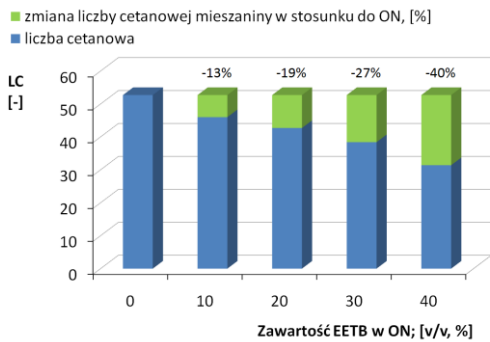
Rys. 2. Wpływ udziału (v/v) EETB w mieszaninie z ON na wartość opałową

Bardziej widoczny jest wpływ EETB na zmianę napięcia powierzchniowego ON. Każdorazowemu dodaniu 10% (v/v) EETB do ON towarzyszy zmniejszenie wartości napięcia powierzchniowego o ok. 5% (rys. 3).



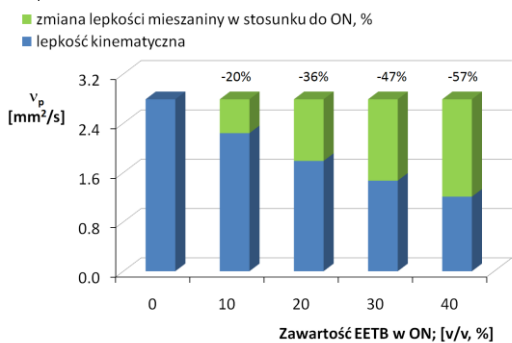
Rys. 3. Wpływ udziału (v/v) EETB w mieszaninie z ON na napięcie powierzchniowe w 20 °C

EETB ma wyraźny wpływ na wartość liczby cetanowej oleju napędowego. Zaledwie 10% (v/v) EETB dodanego do ON powoduje obniżenie LC o ok. 13% (rys. 4). W przypadku ON zawierającego 40% (v/v) EETB stwierdzono 40%-owe obniżenie wartości LC.



Rys. 4. Wpływ udziału (v/v) EETB w mieszaninie z ON na liczbę cetanową

Największy wpływ ma EETB na zmianę lepkości ON. Dla mieszanin zawierających od 10 do 40% (v/v) EETB wartość lepkości kinematycznej była w zakresie 20 – 57% niższa w porównaniu do ON (rys. 5).



Rys. 5. Wpływ udziału (v/v) EETB w mieszaninie z ON na lepkość kinematyczną w 40 °C

4 Konfiguracja stanowiska badawczego

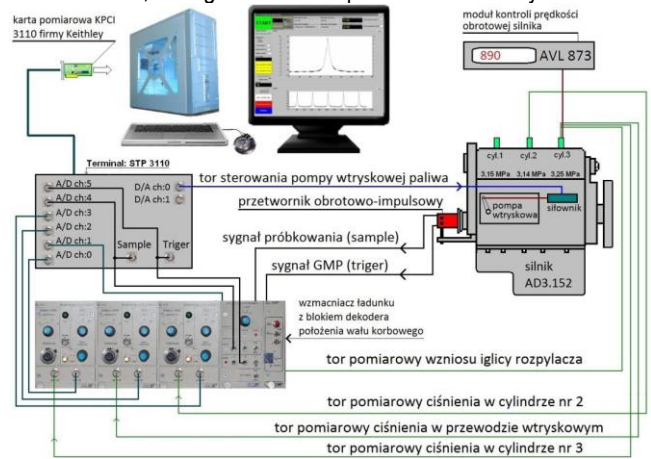
Badania silnikowe zostały zrealizowane w laboratorium badawczym Zakładu Technicznej Eksploatacji Pojazdów Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu. Laboratorium to specjalizuje się w badaniach paliw alternatywnych i zastosowaniu ich w silnikach o zapłonie samoczynnym. Laboratorium wyposażone jest w kilka generacji silników o zróżnicowanym sposobie zasilania. W badaniach zastosowano silnik AD3.152, produkowany w przeszłości przez zakłady URSUS w Warszawie. Zastosowano w nim system bezpośredniego wtrysku paliwa oraz rozdzielaczową pompę wtryskową typu DPA.

Szczegółowe zestawienie najważniejszych danych technicznych badanego silnika AD3.152 przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Specyfikacja techniczna silnika AD3.152

Nazwa parametru	Wartości
Liczba i układ cylindrów	3-rzędowy pionowy
Średnica cylindrów [mm]	91,44
Skok tłoka [mm]	127
Pojemność skokowa [cm³]	2502
Stopień sprężania	16,5
Moc znamionowa [kW/KM]	34,6/47
Znamionowa prędkość obrotowa [obr/min]	2250
Znamionowy moment obrotowy [Nm]	146,8
Maksymalny moment obrotowy [Nm]	165,4
Minimalna prędkość obrotowa biegu luzem [obr/min]	750
System wtrysku paliwa	bezpośredni do cylindra
Rodzaj pompy wtryskowej paliwa	Lucas CAV DPA
Ciśnienie otwarcia wtryskiwacza paliwa [MPa]	17,5
Moment bezwładności ruchomych części silnika [kg·m²]	0,76
Kąt dynamicznego początku tłoczenia paliwa [°OWK]	14° przed GMP

Na potrzeby prowadzonych badań przygotowano stanowisko doświadczalne, którego schemat zaprezentowano na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat stanowiska badawczego z silnikiem AD3.152

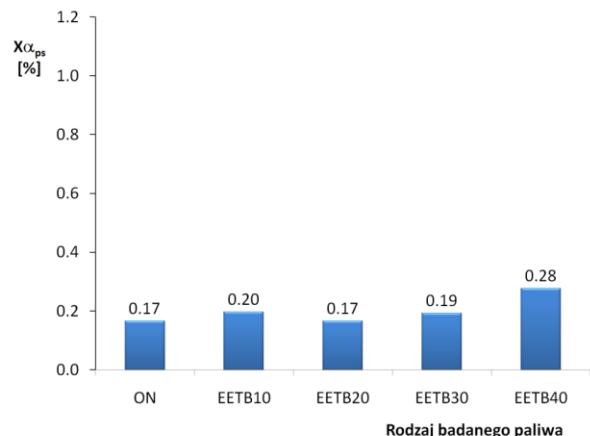
Stanowisko, które pokazano w konfiguracji na rysunku 6 musiało być przystosowane do realizacji badań prowadzonych w warunkach przyspieszania wału korbowego silnika. Polegało to na przeprowadzeniu takich prac, które pozwoliły m.in. kontrolować warunki początkowe pomiaru podczas realizacji badań silnikowych. W ramach tych prac opracowano m.in. system kontroli zmian prędkości obrotowej wału korbowego silnika. Dzięki temu do dalszej analizy wybierano tylko te próby przyspieszania, które rozpoczynały się od tej samej prędkości początkowej z założoną tolerancją tj. +/- 5 obr/min. Ponadto opracowano system, pracujący pod kontrolą komputera, który zapewniał rozpoczęcie próby przyspieszania od wtrysnięcia maksymalnej dawki paliwa zawsze do tego samego cylindra.

5 Właściwości fizykochemiczne mieszanin paliw

a niepowtarzalność wybranych parametrów procesu spalania

5.1 Kąt początku spalania paliwa χ_{ps}

Wartości wskaźnika niepowtarzalności χ_{ps} przedstawiono na rys. 7. Na jego podstawie można stwierdzić, że dla wszystkich badanych paliw niepowtarzalność kąta początku spalania była porównywalnie niska.

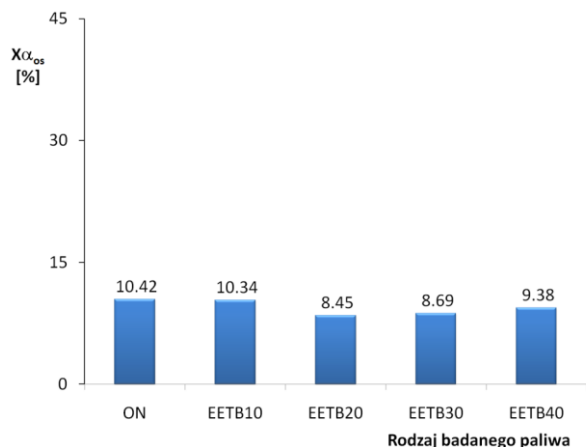


Rys. 7. Wpływ rodzaju badanego paliwa (zawartości EETB w ON) na wskaźnik niepowtarzalności kąta początku spalania

Wartość wskaźnika χ_{ps} była zawarta w zakresie 0,17 – 0,28, co oznacza że badane paliwa nie miały istotnego wpływu na zmianę początku spalania.

5.2 Kąt opóźnienia samozapłonu paliwa $X\alpha_{os}$

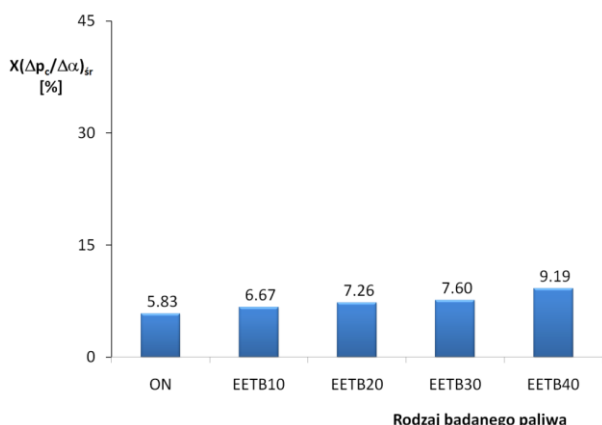
Również w przypadku kąta opóźnienia samozapłonu nie stwierdzono, aby niepowtarzalność tego parametru była istotnie różna dla badanych paliw (rys. 8).



Rys. 8. Wpływ rodzaju badanego paliwa na wskaźnik niepowtarzalności kąta opóźnienia samozapłonu

5.3 Średnia prędkość narastania ciśnienia w cylindrze $(\Delta p_c / \Delta \alpha)_{\text{sr}}$

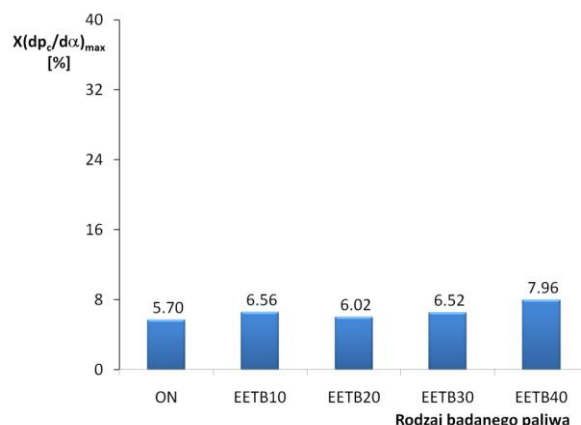
Na podstawie rys. 9 stwierdzono, że dodatek EETB do ON powoduje zauważalny wzrost niepowtarzalności $(\Delta p_c / \Delta \alpha)_{\text{sr}}$. Wartość tego wskaźnika wyznaczona dla EETB40 jest o ok. 36% wyższa w stosunku do ON.



Rys. 9. Wpływ rodzaju badanego paliwa na wskaźnik niepowtarzalności średniej prędkości narastania ciśnienia w cylindrze

5.4 Maksymalna prędkość przyrostu ciśnienia w cylindrze $(dp_c/d\alpha)_{\text{max}}$

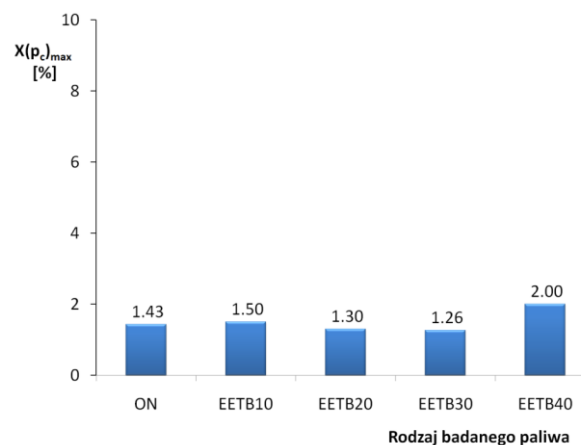
Niepowtarzalność $(dp_c/d\alpha)_{\text{max}}$ jest porównywalna dla wszystkich testowanych paliw poza EETB40 (rys. 10). Dla tego paliwa obserwuje się wzrost wartości wskaźnika niepowtarzalności $(dp_c/d\alpha)_{\text{max}}$ o ok. 40 % w stosunku do ON.



Rys. 10. Wpływ rodzaju badanego paliwa na wskaźnik niepowtarzalności maksymalnej prędkości narastania ciśnienia w cylindrze

5.5 Maksymalne ciśnienie w cylindrze

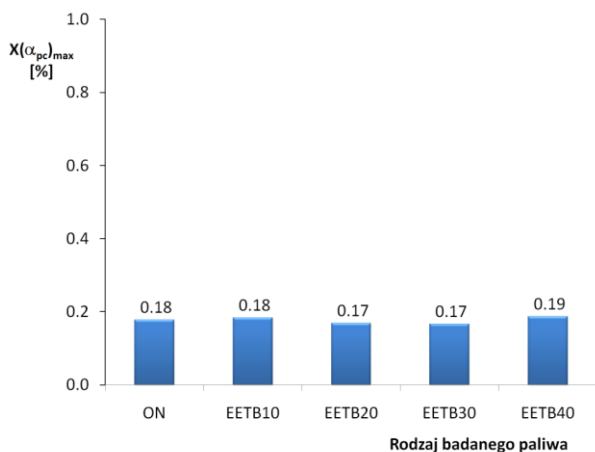
Pomimo zmniejszenia wartości ciśnień maksymalnych panujących w cylindrze, na skutek dodania EETB do ON, nie obserwuje się znaczącej zmiany niepowtarzalności parametru $(p_c)_{\text{max}}$ (poza paliwem EETB40 – rys. 11). Stwierdzone różnice zawierają się w przedziale 5 - 12% w stosunku do ON. W przypadku porównania paliw EETB40 i ON stwierdzona różnica była największa i wyniosła ona ok. 37%.



Rys. 11. Wpływ rodzaju badanego paliwa na wskaźnik niepowtarzalności maksymalnego ciśnienia w komorze spalania

5.6 Kąt występowania maksymalnego ciśnienia w cylindrze $(\alpha_{pc})_{\text{max}}$

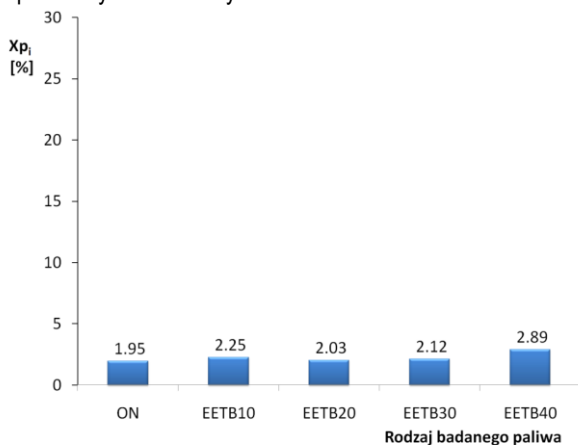
W przypadku kąta występowania maksymalnego ciśnienia w cylindrze zauważono, że najniższa niepowtarzalność tego parametru występuje dla paliw EETB20 i EETB30, a najwyższą dla EETB40 (rys. 12). Pomimo to zaobserwowane różnice nie są znaczące i można je pominąć.



Rys. 12. Wpływ rodzaju badanego paliwa na wskaźnik niepowtarzalności kąta występowania maksymalnego ciśnienia w cylindrze silnika AD3.152

5.7 Średnie ciśnienie indykowane

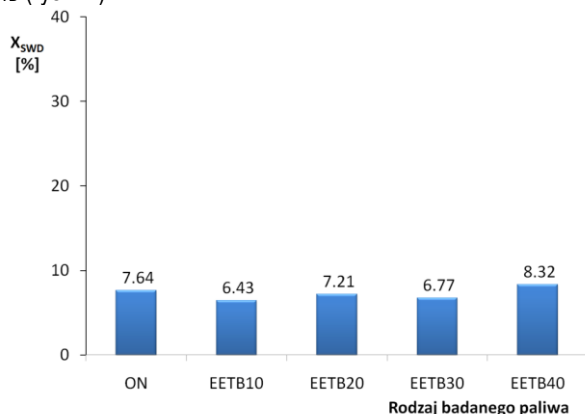
Z wyników badań widać, że w przypadku paliwa EETB40 wartość wskaźnika niepowtarzalności p_i jest wyższa w stosunku do pozostałych paliw (rys. 13). Może to wskazywać, że proces spalania EETB40 przebiegał z większymi zaburzeniami w stosunku do spalania pozostałych testowanych mieszanin.



Rys. 13. Wpływ rodzaju badanego paliwa na wskaźnik niepowtarzalności średniego ciśnienia indykowanego

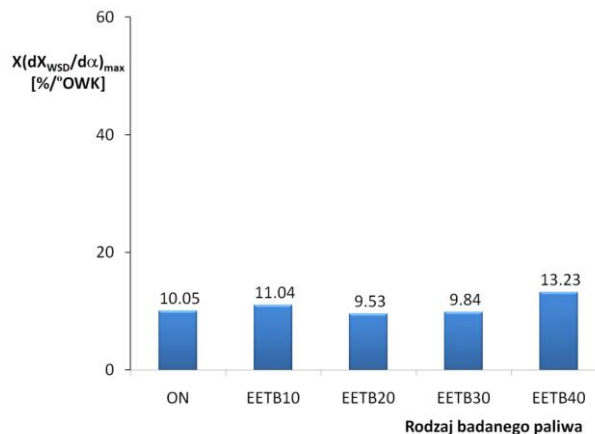
5.8 Stopień wypalenia dawki paliwa

Na koniec przedstawionej oceny postanowiono zaprezentować współczynnik niepowtarzalności stopnia wypalenia dawki paliwa X_{SWD} (rys. 14).



Rys. 14. Wpływ rodzaju badanego paliwa na wskaźnik niepowtarzalności stopnia wypalenia dawki

Uzyskane rezultaty wyraźnie wskazują na to, że otrzymane wartości wskaźnika X_{SWD} są porównywalne. Jedynie dla mieszaniny EETB40 niepowtarzalność X_{SWD} jest większa o 9% w stosunku do ON. Może to potwierdzać, że proces spalania paliwa EETB40 w testowanym silniku zachodził z większymi zaburzeniami. Potwierdza to także wskaźnik niepowtarzalności maksymalnej prędkości stopnia wypalenia dawki (rys. 15).



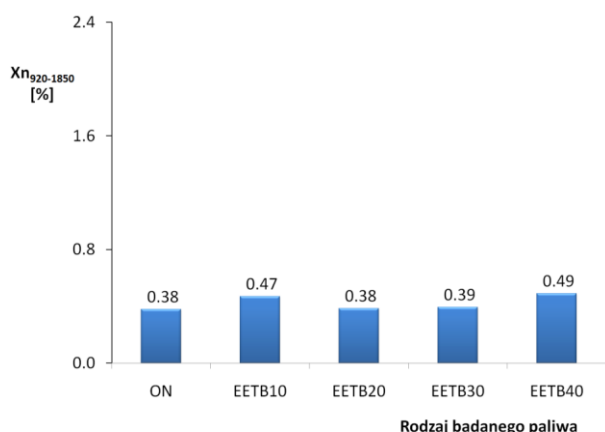
Rys. 15. Wpływ rodzaju badanego paliwa na wskaźnik niepowtarzalności maksymalnej prędkości stopnia wypalenia dawki

Rezultaty pokazane na rysunku 15 wskazują, że maksymalna prędkość stopnia wypalenia dawki odczytana z charakterystyki jest podobnie niepowtarzalna dla wszystkich testowanych mieszanin poza EETB40. Dla tego paliwa zaobserwowano wzrost wartości $X(dx_{WSD}/d\alpha)_{max}$ o ok. 31% w stosunku do ON. W przypadku mieszaniny EETB40 proces spalania zachodził nieco inaczej, tzn. z większymi zaburzeniami, które nie występowały dla procesu spalania ON, oraz paliw: EETB10, EETB20 i EETB30. Analiza wykręśłów indykatorowych wskazuje, że dla paliwa EETB40 częściej obserwowano problemy z samozapłonem mieszanki. Częściej występował on z większym opóźnieniem, co było spowodowane zmianą realizacji procesu wtrysku paliwa oraz wpływem niskiej LC EETB na wydłużony okres opóźnienia samozapłonu.

Wypadkową wszystkich dotychczas analizowanych parametrów/charakterystyk jest wskaźnik niepowtarzalności zmian prędkości obrotowej wału korbowego silnika AD3.152. Był on rozpatrywany w zakresie prędkości od 920 do 1850 obr/min. Tak dobrany zakres nie był przypadkowy, ale wynikał z charakterystyki pracy regulatora prędkości obrotowej badanego silnika. Obserwowano, że odcięcie dawki paliwa w wybranej próbie występowało przy prędkości ok. 1900 obr/min, a przy kolejnej w pobliżu np. 2100 obr/min. Oznaczało to, że regulator jest elementem konstrukcyjnym silnika o dużej niepowtarzalności działania. W związku z tym zdecydowano analizować przyrost prędkości obrotowej wału w zakresie od 920 do 1850 obr/min, a więc w zakresie w którym regulator pompy wtryskowej nie oddziałował negatywnie na jej dawkowanie.

5.9 Zmiany prędkości obrotowej wału korbowego silnika

Jak widać z rysunku 16 niepowtarzalność zmian prędkości obrotowej testowanego silnika w rozpatrywanym zakresie jest niewielka i nie przekracza wartości 0,54%. Dla większości paliw tzn. ON oraz EETB10, EETB20 i EETB30 uzyskane wskaźniki są podobnie niepowtarzalne, a stwierdzone różnice nie przekraczają wartości 10%.



Rys. 16. Wpływ rodzaju badanego paliwa na wskaźnik niepowtarzalności zmian prędkości w procesie przyspieszania wału korbowego silnika AD3.152

Jedynie dla paliwa EETB40 wskaźnik niepowtarzalności $Xn_{920-1850}$ jest większy o ok. 48% w stosunku do ON, co można tłumaczyć wcześniej opisanymi zaburzeniami procesu spalania tego paliwa.

Uzupełnieniem przy wyjaśnieniu przyczyn powodujących zaburzenia procesu spalania (oprócz różnic parametrów wtrysku wynikających z różnych właściwości fizykochemicznych badanych mieszanin paliw w stosunku do ON) jest i to, że parametry konstrukcyjne (kształt komory spalania, fazy rozrządu, umiejscowienie wtryskiwaczy, wymiary otworków rozpylaczy) i regulacyjne silnika były optymalizowane przez jego producenta do zasilania olejem napędowym.

Podsumowanie

EETB dodawany do ON w objętości do 30% nie ma istotnego wpływu na zmianę wartości analizowanych parametrów roboczych silnika, jak np.:

- kąta początku spalania,
- maksymalnej wartości ciśnienia w cylindrze,
- kąta występowania maksymalnego ciśnienia,
- średniego ciśnienia indykowanego,
- prędkości w procesie przyspieszania wału korbowego.

Dla pozostałych analizowanych parametrów można stwierdzić, że EETB mieszany z ON ma niewielki wpływ na zmianę wartości ocenianych wskaźników niepowtarzalności. Jedynie dla paliwa EETB40 stwierdzono nieco większą niepowtarzalność analizowanych parametrów procesu spalania. Można to tłumaczyć niską LC tej mieszaniny, co miało wpływ na zwiększony zakres zaburzenia procesu spalania w stosunku do pozostałych badanych paliw.

Wydaje się, że najważniejszym wskaźnikiem potwierdzającym brak wpływu EETB dodawanego do ON na niepowtarzalność realizacji procesów roboczych silnika jest niepowtarzalność zmian prędkości obrotowej wału korbowego $Xn_{920-1850}$, którą wyznaczono dla procesu jego przyspieszania. Wartość tego wskaźnika nie przekra-

czały 0,5%, co jest porównywalne z niepowtarzalnością prędkości początkowej Xn_{880} .

Wartości wszystkich badanych wskaźników niepowtarzalności, które przedstawiono w niniejszym artykule zawierają się w zakresie 0,17 - 13,23 %. Wartość minimalną tj. 0,17% uzyskano dla wskaźnika niepowtarzalności kąta początku spalania i kąta występowania maksymalnego ciśnienia, a maksymalną 13,23% dla maksymalnej prędkości stopnia wypalenia dawki paliwa.

Bibliografia:

1. Józwiak J., Podgórski J., Statystyka od podstaw, PWE, Warszawa 2012.
2. Sobczyk M.: Statystyka opisowa, C.H. Beck, Warszawa 2010
3. Starzyńska W. (red.): Podstawy statystyki, Difin, Warszawa 2000
4. Longwic R., Lotko W.: Dynamiczne własności pracy silnika o zaplonie samoczynnym zasilanego nowymi rodzajami paliw węglowodorowych, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2003.
5. Longwic R.: Charakterystyka działania silnika o zaplonie samoczynnym w warunkach swobodnego rozpędzania. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2011.

Impact of fuel parameters on unrepeatability of combustion process in diesel engine

The paper is focused on analysis of unrepeatability index of selected combustion parameters in diesel engine fuelled with diesel fuel (DF) blended with ethyl tert-butyl ether (ETBE). Necessary tests were carried out in conditions of free acceleration process of the engine crankshaft without external load. Results showed that ETBE added to DF did not impact significantly on unrepeatability of combustion process in tested engine.

Keywords: ETBE, diesel engine, alternative fuels, fuel blends

Autorzy:

prof. dr hab. inż. **Wincenty Lotko** - Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, w.lotko@uthrad.pl

dr hab. inż. **Krzysztof Górski** - Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, krzysztof.gorski@uthrad.pl

dr inż. **Zygmunt Trela** - Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, trelaz@uthrad.pl

dr inż. **Robert Gielniewski** - Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, r.gielniewski@uthrad.pl

mgr inż. **Jerzy Maksym** - Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, j.maksym@uthrad.pl