

Rafał Longwic¹, Wincenty Lotko², Krzysztof Górski²

WYBRANE PARAMETRY PROCESU SPALANIA MIESZANIN OLEJU NAPĘDOWEGO Z ETEREM ETYLO-TERT-BUTYLOWYM W SILNIKU O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane parametry procesu spalania mieszanin eteru etylo-tert-butyłowego (EETB) z olejem napędowym w silniku o zapłonie samoczynnym. Badania prowadzono metodą swobodnego rozpędzania silnika. Poddano analizie wpływ parametrów fizykochemicznych badanych paliw na obserwowane parametry procesu spalania.

Słowa kluczowe: silnik o zapłonie samoczynnym, warunki nieustalone, proces spalania, eter etylo-tert-butyłowy.

WSTĘP

Badania dotyczące zastosowanie eteru etylo-tert-butyłowego (EETB) w mieszaninach z olejem napędowym (O)N są częścią przedsięwzięcia naukowego podejmowanego przez autorów, a dotyczącego poszukiwania dodatku do oleju napędowego, który wpływałby na poprawę przebiegu procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym (ZS) [2, 3]. W tym zakresie wykazano m.in. bardzo korzystny wpływ EETB na ograniczenie emisji cząstek stałych (PM) [5]. Również rezultaty badań prowadzonych przez innych autorów wykazują szereg korzyści ekologicznych wynikających z zastosowania EETB jako dodatku zawierającego tlen do oleju napędowego [4, 5].

Eter etylo-tert-butyłowy jest uzyskiwany w reakcji etanolu z izobutylenem. Jest stosowany jako komponent tlenowy benzyn silnikowych. W przeszłości wykorzystywano do tego celu eter metylo-tert butyłowy (EMTB). Jednak ze względu na jego niekorzystne własności ekologiczne został on wycofany z użycia. Cechami charakterystycznymi EETB są przede wszystkim specyficzny zapach, wysoka lotność oraz niska temperatura zapłonu.

EETB w przeciwieństwie do etanolu nie posiada polarnej grupy wodorotlenowej. W przypadku etanolu odpowiadała ona za jego higroskopijność tj. skłonność do pochłaniania wody z otoczenia. W ten sposób powstaje mieszanina azeotropowa

¹ Katedra Pojazdów Samochodowych, Politechnika Lubelska.

² Zakład Technicznej Eksploatacji Pojazdów, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Politechnika Raddomska.

wody z etanolem o stężeniu alkoholu (zależnie od temperatury i ciśnienia) od 95,5% do 97,5% (v/v). W cząsteczce EETB atom tlenu jest związany z dwoma atomami węgla. Taka budowa eteru powoduje, że jego mieszalność z wodą jest znikoma. Jednocześnie uzyskuje się jego bardzo dobrą mieszalność z olejem napędowym, która nie ulega znaczącej zmianie pod wpływem temperatury. Wybrane własności fizykochemiczne EETB przedstawiono w tabeli 1.

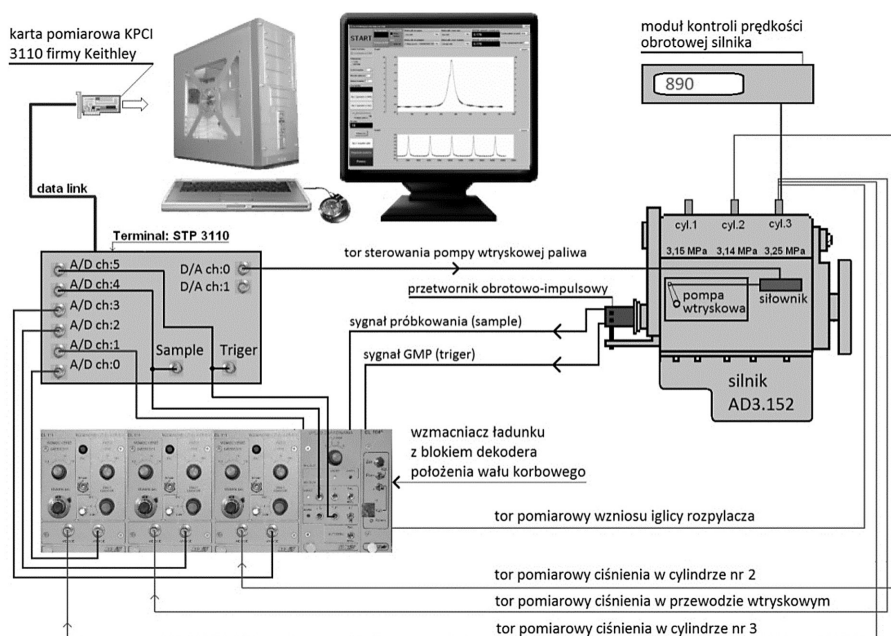
Tabela 1. Wybrane własności fizykochemiczne EETB

L.p.	Nazwa własności	Wartość
1.	Masa cząsteczkowa, [g/mol]	102,18
2.	Zawartość węgla, [%] (m/m)	70,53
3.	Zawartość wodoru, [%] (m/m)	13,81
4.	Zawartość tlenu, [%] (m/m)	15,66
5.	Gęstość, [g/cm ³]	0,745
6.	Lepkość w temp. 40 °C, [mm ² /s]	<1
7.	Rozpuszczalność H ₂ O w EETB, [%]	0,5
8.	Rozpuszczalność EETB w H ₂ O, [%]	1,2
9.	Temperatura zapłonu, [°C]	-19
10.	Temperatura samozapłonu, [°C]	310
11.	Ciepło parowania, [kJ/Mol]	32,97
12.	Ciepło spalania, [MJ/kg] (wet)	36,2
13.	Ciepło spalania, [MJ/kg] (dry)	39
14.	Wzór chemiczny, [-]	C ₆ H ₁₄ O
15.	Wartość pH, [-]	6,4
16.	Ciśnienie par, [kPa]	28
17.	Liczba cetanowa, [-]	8
18.	Liczba oktanowa (badawcza), [-]	119
19.	Liczba oktanowa (motorowa), [-]	103
20.	Temperatura wrzenia, [°C]	72
21.	Oddziaływanie korozyjne,	1A

Na uwagę zasługuje mała wartość liczby cetanowej oraz duża temperatura samozapłonu rozpatrywanego eteru. Są to cechy, które nie sprzyjają jego bezpośredniemu zastosowaniu jako samoistnego paliwa do zasilania silników o zapłonie samoczynnym. Szereg różnic we własnościach fizykochemicznych EETB w stosunku do oleju napędowego ma wielokierunkowy wpływ na przebieg procesu spalania i wtrysku przebiegającego w warunkach statycznych jak i nieustalonych.

OPIS BADAŃ EMPIRYCZNYCH, METODYKA BADAŃ

Przeprowadzone badania empiryczne miały na celu uzyskanie danych do wyznaczenia wybranych parametrów procesu spalania mieszanin oleju napędowego z EETB. Rejestrowano prędkość obrotową wału korbowego silnika i ciśnienie wewnątrz komory spalania, w warunkach swobodnego rozpędzania wywołanego skokową zmianą położenia dźwigni sterującej dawką paliwa. Obiektem badawczym był niedoładowany silnik o zapłonie samoczynnym z wtryskiem bezpośrednim. W celu wykonania badań empirycznych zestawiono stanowisko pomiarowe pokazane na rysunku 1



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego [3]

W badaniach stosowano mieszaniny oleju napędowego z EETB o własnościach fizykochemicznych przedstawionych w tabeli 2. Metodykę oraz warunki pomiaru ww. parametrów fizykochemicznych przedstawiono w pracy [3]. Przykładowo w paliwie EETB30 zawartość objętościowa EETB w mieszaninie z olejem napędowym wynosiła 30%. Testowany olej napędowy, w odmianie przejściowej, zawierał 4,8% (objętościowo) dodatku FAME (estrów nienasyconych kwasów tłuszczowych).

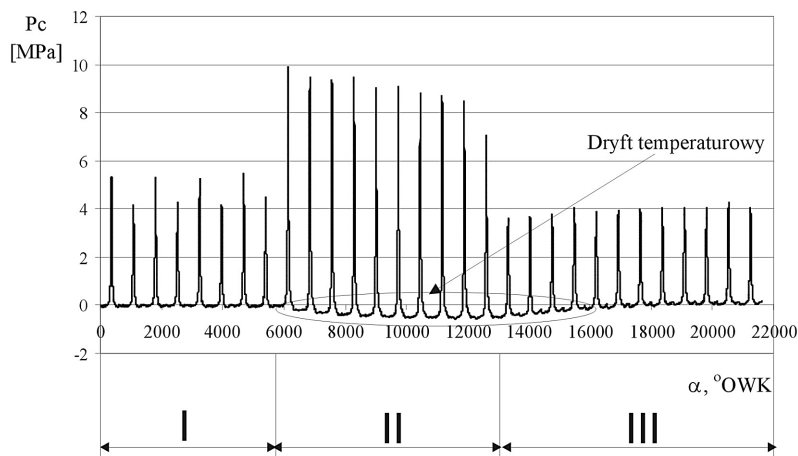
Na rysunku 2 pokazano przykładową rejestrację ciśnienia w komorze spalania dla 30 kolejnych cykli pracy silnika w warunkach swobodnego rozpędzania. Metodykę prowadzonej próby rozpędzania opisano między innymi w [1].

Tabela 2. Własności fizykochemiczne badanych paliw [3]

Paliwo	Napięcie powierzchniowe [mN/m]	Liczba cetanowa [-]	Gęstość [g/cm ³]	Wartość opałowa [MJ/kg]	Lepkość kinematyczna [mm ² /s]
ON	25,9	52,7	0,839	42,8	2,79
EETB10	24,6	46,0	0,831	42,1	2,24
EETB20	23,3	42,7	0,821	41,1	1,79
EETB30	22,1	38,4	0,814	40,8	1,47
EETB40	21,2	31,4	0,804	40,0	1,21

W zarejestrowanym przebiegu ciśnienia w komorze spalania można wyróżnić trzy okresy pracy silnika – patrz rysunek 2 (przebieg pierwotny bez obróbki numerycznej – obarczony zjawiskiem dryftu temperaturowego [1]):

- I. okres pracy na biegu jałowym – prędkość obrotowa wału korbowego i temperatura oleju pracującego silnika są równe wartościom ustalonym dla warunków początkowych, położenie listwy sterującej dawką paliwa $h \cong \text{const}$, przyspieszenie kątowe wału korbowego silnika $\varepsilon = 0$.
- II. okres pracy w warunkach swobodnego rozpędzania – $n \neq \text{const}$, nieustalony stan cieplny silnika, $h = h_{\text{max}}$, $\varepsilon \neq 0$;
- III. okres pracy na biegu luzem – $n = n_{\text{max}}$, quasi ustalony stan cieplny silnika, $h \cong \text{const}$, $\varepsilon = 0$.



Rys. 2. Wartości ciśnienia w komorze spalania dla 30 kolejnych cykli pracy silnika w warunkach swobodnego rozpędzania – przebieg pierwotny bez żadnej obróbki numerycznej

Uzyskane przebiegi ciśnienia w komorze spalania posłużyły do obliczenia wartości średniego ciśnienia indykowanego, maksymalnego ciśnienia spalania, kąta wy-

stępowania początku spalania, kąta występowania maksymalnego ciśnienia i maksymalnej prędkości narastania ciśnienia wewnątrz komory spalania.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

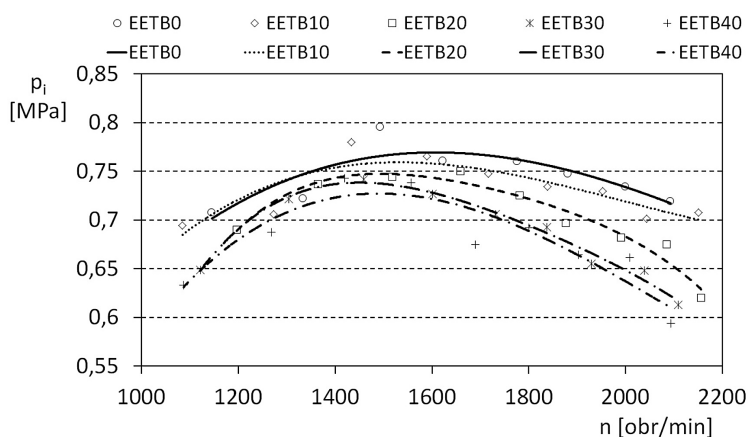
Zasilania silnika o ZS mieszaninami EETB z ON teoretycznie winno skutkować odmiennym przebiegiem procesu spalania w stosunku do spalania czystego oleju napędowego. Obserwowane różnice powinny być spowodowane głównie:

- odmiennym przebiegiem procesu wtrysku – głównie z powodu mniejszej lepkości mieszanin EETB z ON w stosunku do ON maleje maksymalne ciśnienie wtrysku i kąt początku wtrysku – przy porównywalnych wartościach kąta trwania wtrysku może to prowadzić do nieznacznego zmniejszenia dawki wtryskiwanych mieszanin EETB z ON w stosunku do ON [3];
- dla mieszanin EETB z ON stwierdzono maksymalnie o około 40% mniejszą wartość liczby cetanowej w stosunku do ON – powinno to powodować wydłużenie okresu przedpłomienego a zatem zwiększenie wartości kąta zwłoki samozapłonu; większe wartości kąta zwłoki samozapłonu będą oddziaływać na wzrost wartości maksymalnej i średniej prędkości narastania ciśnienia;
- mniejsza lepkość, gęstość i napięcie powierzchniowe dla mieszanin EETB z ON w stosunku do ON mogą powodować zmiany parametrów tworzenia mieszaniny palnej takich jak: zasięg strugi paliwa, kąt rozpylenia paliwa, średnica kropel paliwa, średnia średnica Sautera, moment występowania wtórnego rozpadu kropel paliwa.

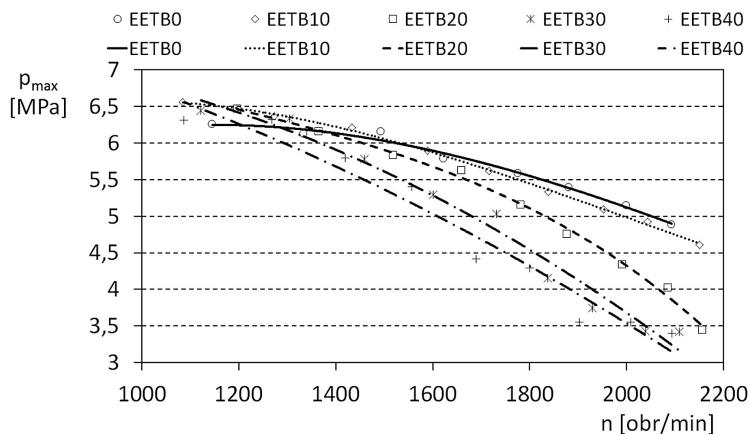
Najistotniejszym czynnikiem warunkującym przebieg procesu spalania jest w rozpatrywanym przypadku znacząca różnica w wartościach liczby cetanowej dla mieszanin EETB z ON w stosunku do ON. Wartość liczby cetanowej ma bezpośredni wpływ na okres i kąt zwłoki samozapłonu. Opóźnienie samozapłonu odgrywa istotną rolę w procesie spalania i ma bezpośredni wpływ na przebieg wartości ciśnienia wewnątrz cylindra. Nie bez znaczenia dla przebiegu procesu spalania mieszanin EETB z ON jest budowa chemiczna cząsteczki EETB. Należy się spodziewać, że duża zawartość tlenu związanego w cząsteczce tego paliwa będzie się przyczyniać do poprawy procesu spalania szczególnie w silnikach z wtryskiem bezpośrednim, które charakteryzują się lokalnym niedoborem tlenu do spalania, co jest istotne zwłaszcza w warunkach nieustalonych.

Na rysunkach od 3 do 7 pokazano przebieg wybranych parametrów procesu spalania dla silnika AD 3.152 zasilanego paliwami badanymi w warunkach swobodnego rozpędzania, przy kącie dynamicznego początku tłoczenia paliwa $\alpha_{\text{dpt}}=10^\circ\text{OWK}$. Stwierdzono, że wartości średniego ciśnienia indykowanego wzrastały przy zmniejszeniu udziału objętościowego EETB w mieszaninie z ON. Maksymalna różnica bezwzględna występowała dla ON i EETB40 i wynosiła około 0,1 MPa – rysunek 3. Istotne różnice zaobserwowano również dla maksymalnego ciśnienia spalania –

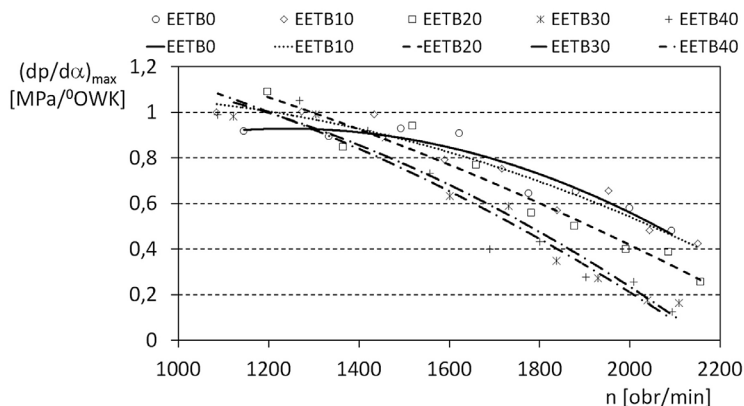
rysunek 4. Maksymalne ciśnienia spalania były mniejsze dla większych udziałów objętościowych EETB w mieszaninie z ON. Wspomniane różnice powiększały się przy wzroście prędkości obrotowej silnika i wynosiły maksymalnie dla EETB 40 i ON około 2 MPa. Obserwowano również mniejsze wartości maksymalnej prędkości narastania ciśnienia dla mieszanin ON z EETB w stosunku do ON – rysunek 5. Dla maksymalnej prędkości narastania ciśnienia różnice pomiędzy paliwami z domieszką EETB i czystym olejem napędowym ON powiększały się wraz ze wzrostem prędkości obrotowej i wynosiły maksymalnie około 0,7 MPa/°OWK (pomiędzy EETB40 i ON). Nie obserwowano zatem wzrostu maksymalnej prędkości narastania ciśnienia dla mieszanin EETB z ON w stosunku do ON, który mógłby być spowodowany mniejszymi wartościami liczby cetanowej dla większych udziałów EETB w mieszaninie z ON.



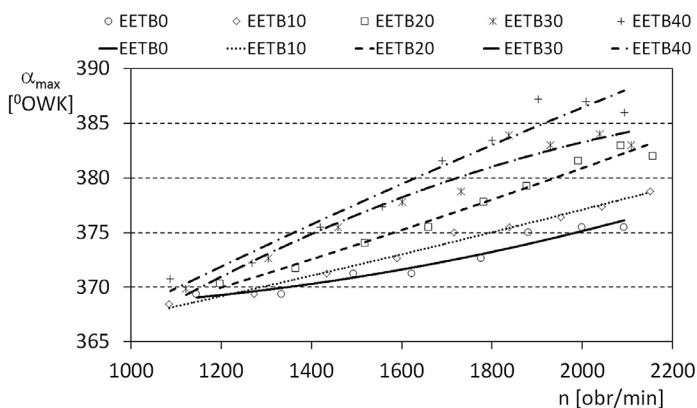
Rys. 3. Przebieg średniego indykowanego w zależności od prędkości obrotowej przy zasilaniu silnika mieszaninami oleju napędowego z EETB



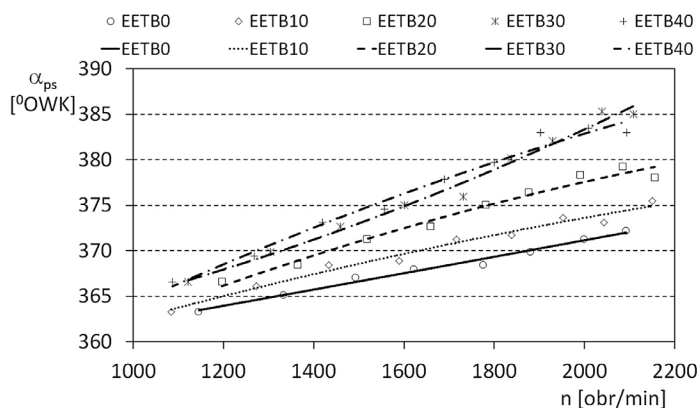
Rys. 4. Przebieg maksymalnego ciśnienia spalania w zależności od prędkości obrotowej przy zasilaniu silnika mieszaninami oleju napędowego z EETB



Rys. 5. Przebieg maksymalnej prędkości narastania ciśnienia w zależności od prędkości obrotowej przy zasilaniu silnika mieszaninami oleju napędowego z EETB



Rys. 6. Przebieg kąta występowania maksymalnego ciśnienia spalania w zależności od prędkości obrotowej przy zasilaniu silnika mieszaninami oleju napędowego z EETB



Rys. 7. Przebieg kąta występowania początku spalania w zależności od prędkości obrotowej przy zasilaniu silnika mieszaninami oleju napędowego z EETB

Mała wartość liczby cetanowej dla EETB, przy niewielkich różnicach w kącie początku wtrysku (obserwowano niewielkie zmniejszenie kąta początku wtrysku przy większych udziałach objętościowych EETB w mieszaninie z ON [3]) skutkowało zwiększeniem kątów występowania początku spalania i maksymalnego ciśnienia spalania dla większych udziałów EETB w mieszaninie z ON. Maksymalne różnice dochodziły nawet do około 13°OWK – rysunek 6 i 7.

WNIOSKI

W pracy przedstawiono wybrane parametry procesu spalania mieszanin oleju napędowego z terem etylo-tert-butylovym w silniku o zapłonie samoczynnym. Badania prowadzono w warunkach nieustalonych metodą swobodnego rozpędzania, wywołanego skokową zmianą położenia dźwigni sterującej dawką paliwa. Stwierdzono, że wzrost zawartości EETB w mieszaninie z ON wpływa na zmniejszenie wartości średniego ciśnienia indykowanego i maksymalnego ciśnienia spalania - obserwowane różnice bezwzględne wzrastały wraz ze wzrostem prędkości obrotowej silnika. Wynika to głównie z faktu zmniejszania się wartości opałowych dla większych udziałów objętościowych EETB w mieszaninie z ON. Nie bez znaczenia jest również mniejsza lepkość mieszanin EETB z ON w stosunku do ON, która oddziałuje na zmniejszenie dawki objętościowej wtryskiwanego paliwa. Zmniejszająca się wraz udziałem EETB w mieszaninie z ON gęstość wpływać będzie dodatkowo na zmniejszenie wielkości dawki masowej a zatem i dawki energetycznej. Z uwagi na powyższe nie obserwowano wzrostu maksymalnej prędkości narastania ciśnienia mimo, że zwiększenie udziału EETB w mieszaninie z ON wpływa na zmniejszenie liczby cetanowej. Proces spalania rozpoczął się później ale z uwagi na mniejsze ilości energii doprowadzonej wraz z paliwem nie następował wzrost maksymalnego ciśnienia spalania i maksymalnej prędkości narastania ciśnienia. Nieduże różnice w wartościach średniego ciśnienia indykowanego potwierdzają możliwość stosowanie EETB jako domieszki do oleju napędowego. Wpływa to jak wspomniano na wstępie pracy na zmniejszenie emisji cząstek stałych co jest szczególnie istotne w nieustalonych warunkach pracy silników spalinowych.

LITERATURA

1. Longwic R., Charakterystyka działania silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach swobodnego rozpędzania, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2011.
2. Lotko W., Górski K., Zasilanie silnika wysokoprężnego mieszaninami ON i EETB, WNT, Warszawa 2011.
3. Lotko W., Górski K., Longwic R., Nieustalone stany pracy silnika wysokoprężnego zasilanego olejem napędowym z eterem etylo - tert - butylovym, Monografia, WK i Ł, Warszawa 2010.

4. Menezes E.W., Silva R., Cataluña R., Ortega R.J.C., Effect of ethers and ether/ethanol additives on the physicochemical properties of diesel fuel and on engine tests, FUEL 85 (2006) 815–822.
5. 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 88(10): 2017-2024 (2009).

THE SELECTED PARAMETERS OF THE COMBUSTION PROCESS OF DIESEL FUEL AND ETHYL-TERT-BUTYL ETHER MIXTURES IN DIESEL ENGINE

Abstract

In the article shown the selected parameters of the combustion process of ethyl-tert-butyl ether (EETB) with diesel fuel mixtures in Diesel engine. Research conducted by the free engine run-up. Explores the impact of physico-chemical parameters of the tested fuels on combustion process parameters observed.

Keywords: diesel engine, transient conditions, burning process, ethyl-tert-butyl ether.