MECHANIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
MECHANICS
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
3-M/2012
ZESZYT 8
ROK 109
ISSUE 8
YEAR 109

ARTUR JAWORSKI, HUBERT KUSZEWSKI, KAZIMIERZ LEJDA,
ADAM USTRZYCKI, PAWEŁ WOŚ*

OZNACZANIE LICZBY CETANOWEJ WYBRANYCH PALIW NA PODSTAWIE SPALANIA W KOMORZE O STAŁEJ OBJĘTOŚCI W ASPEKCIE ICH ZASTOSOWANIA W SILNIKU O ZMIENNYM STOPNIU SPRĘŻANIA VCR

CETANE NUMBER DETERMINATION WITH CONSTANT-VOLUME CHAMBER COMBUSTION METHOD FOR SELECTED FUELS TOWARDS THEIR USING IN VARIABLE COMPRESSION RATIO VCR ENGINE

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodykę oraz wyniki badań liczby cetanowej paliw w aspekcie możliwości ich zastosowania w silniku o zmiennym stopniu sprężania 4 VD 14,5/12-1 SRW. Badania przeprowadzono w Laboratorium Zakładu Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Rzeszowskiej. Ponadto porównano wyniki badań paliw wzorcowych oznaczonych metodą silnikową z metodą opartą na komorze o stałej objętości.

Słowa kluczowe: właściwości zapłonowe paliw, opóźnienie samozapłonu, liczba cetanowa, stopień sprężania, badania w komorze spalania o stałej objętości.

Abstract

The paper presents the methodology and results of fuel cetane number investigations as the pre-tests for powering variable compression ratio engine 4 VD 14.5/12-1 SRW. The study was conducted at the Laboratory of the Department of Automotive Vehicles and Internal Combustion Engines, Rzeszow University of Technology. Additionally, the results acquired with a constant volume chamber are compared to cetane number of reference fuels measured with use the motor method.

Keywords: fuel ignition properties, autoignition delay, cetane number, compression ratio, constant-volume combustion chamber tests.

* Dr inż. Artur Jaworski, dr inż. Hubert Kuszewski, prof. dr hab. inż. Kazimierz Lejda, dr inż. Adam Ustrzycki, dr inż. Paweł Woś, Zakład Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska.

1. Wstęp

Dążenie do ograniczania niekorzystnych efektów zewnętrznych związanych z rozwojem motoryzacji i transportu, opartych głównie o tłokowy silnik spalinowy jako podstawowe źródło napędu, przejawia się przede wszystkim limitowaniem emisji szkodliwych związków zawartych w spalinach, tj. tlenku węgla CO, węglowodorów HC, tlenków azotu NO_X i cząstek stałych PM. Ponadto w obliczu narastającego zjawiska globalnego ocieplenia oraz kurczących się zasobów paliw płynnych, szczególną uwagę zwraca się także na zmniejszenie zużycia paliwa, a tym samym emisji dwutlenku węgla CO_2. Niestety specyfika procesów roboczych w silnikach tłokowych nie pozwala w prosty sposób spełnić jednocześnie wszystkie powyższe wymagania. Pomimo znacznego postępu dokonanego w ostatnich latach, dalsza poprawa parametrów ekologiczno-energetycznych silników tłokowych wymaga kolejnych zmian w ich konstrukcji, obejmujących praktycznie wszystkie układy funkcjonalne.

Jedną z bardziej efektywnych ścieżek, chociaż na obecnym etapie rozwoju niosących wciąż wiele trudności natury technicznej i eksploatacyjnej, jest konstrukcja silników, w których stopień sprężania jest parametrem regulacyjnym i może być zmieniany bezstopniowo w szerokim zakresie i stosunkowo krótkim czasie. Technologia ta oznaczana jest symbolem VCR pochodzącym od anglojęzycznego terminu *Variable Compression Ratio* – zmienny stopień sprężania.

W Zakładzie Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Rzeszowskiej trwają prace nad konstrukcją silnika 4 VD 14,5/12-1 SRW o zmiennym stopniu sprężania [8].

2. Opis badań

Do określenia zdolności paliwa do samozapłonu i odpowiedniej regulacji stopnia sprężania w silniku VCR kluczowe znaczenie ma oznaczanie liczby cetanowej paliwa. W tym zakresie na szczególną uwagę zasługuje normatywna metoda oznaczania pochodnej liczby cetanowej (DCN), która determinowana jest przebiegiem spalania w komorze o stałej objętości.

Do oznaczenia wartości LC można wykorzystać jedną z trzech metod pomiaru. Są to:
- analiza widmowa w średniej podczerwieni,
- metoda polegająca na porównaniu właściwości zapłonowych z analogicznymi właściwościami mieszanek paliw wzorcowych o znanych LC; badania prowadzi się w znormalizowanych warunkach z użyciem silnika badawczego,
- metoda polegająca na obliczeniu pochodnej liczby cetanowej na podstawie średniej wartości opóźnienia zapłonu, które mierzone jest w oparciu o przebieg spalania w komorze o stałej objętości.

Analiza widmowa w średniej podczerwieni umożliwia rozróżnianie i określanie ilości poszczególnych składników w próbce paliwa. Każdy składnik paliwa cechuje się właściwym sobie widmem pochłaniania. Ilość absorbowanej energii w pojawiających się charakterystycznych „pikach" absorbancji określana jest na podstawie specjalnie dobranego zestawu optycznych filtrów pasmowych. Ilość pochłoniętego światła jest proporcjonalna do stężenia danego składnika w próbce paliwa [7].

W metodzie silnikowej określony jest sposób oceny oleju napędowego w odniesieniu do przyjętej skali liczb cetanowych z wykorzystaniem znormalizowanego, jednocylindrowego silnika czterosuwowego o zapłonie samoczynnym. W silniku zastosowany jest

pośredni wtrysk paliwa do komory wstępnej. W metodzie silnikowej można określać LC w pełnym zakresie, tj. od LC = 0 do LC = 100. Oznaczenie może obejmować paliwa niekonwencjonalne.

Metoda oznaczania LC paliwa na stanowisku silnikowym polega na porównaniu jego właściwości samozapłonowych z analogicznymi właściwościami mieszanek paliw wzorcowych o znanych wartościach LC. Poprzez właściwości samozapłonowe rozumie się miarę opóźnienia zapłonu paliwa. W opisywanej metodzie, jako paliwa wzorcowe pierwotne przyjęto heksadekan (cetan), heptametylononan (HMN) oraz mieszanki tych składników w proporcjach objętościowych. Paliwa te są wykorzystywane do definiowania skali liczb cetanowych, zgodnie z zależnością [4]:

$$LC = \%cetanu + 0{,}15\ (\%HMN) \tag{1}$$

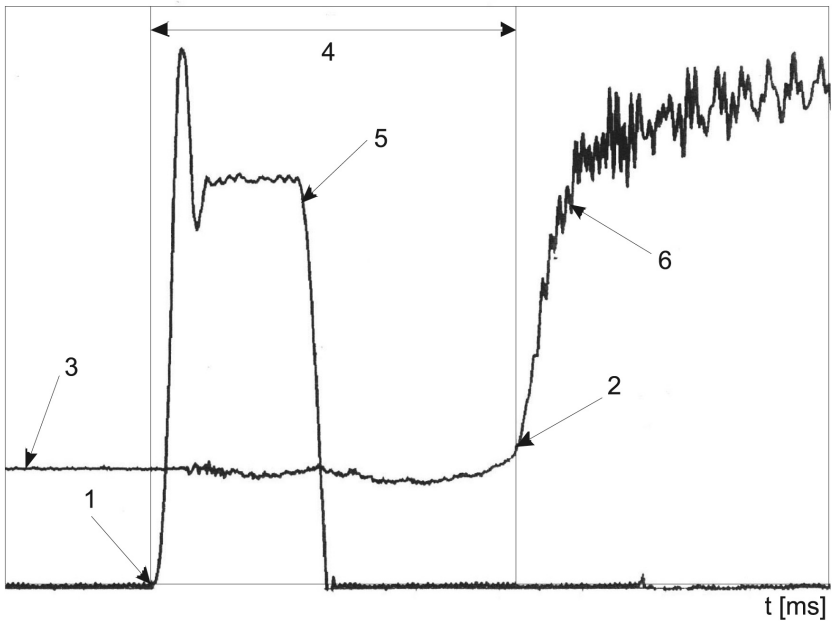
W metodzie silnikowej podstawą określenia LC jest precyzyjny pomiar kąta opóźnienia zapłonu. W tym celu wykorzystuje się miernik cetanowy (miernik opóźnienia zapłonu), czujnik wtryskiwacza oraz czujnik spalania. Miernik cetanowy to przyrząd elektroniczny wyświetlający kąt wyprzedzenia wtrysku oraz kąt opóźnienia zapłonu. Czujnik wtryskiwacza to przetwornik do rejestracji ruchu iglicy wtryskiwacza. Na tej podstawie określa się precyzyjnie początek wtrysku paliwa. Czujnik ciśnienia spalania wskazuje gwałtowny przyrost ciśnienia, co odpowiada początkowi spalania.

Metoda silnikowa oznaczania LC jest metodą normatywną. Sposób oznaczania LC precyzuje norma PN-EN ISO 5165:2003 Przetwory naftowe. Oznaczanie właściwości zapłonowych olejów napędowych. Metoda silnikowa oznaczania liczby cetanowej. Do oznaczenia LC do celów określenia wymagań, jakie muszą spełniać oleje napędowe wg normy PN-EN 590+A1:2011, może być zastosowana norma PN-EN ISO 5165:2003.

Do oznaczania LC norma PN-EN 590+A1:2011 dopuszcza również stosowanie normy PN-EN 15195:2009 Ciekłe przetwory naftowe. Oznaczanie opóźnienia zapłonu i pochodnej liczby cetanowej (DCN) paliw ze średnich destylatów przez ich spalanie w komorze o stałej objętości. Metoda opisuje sposób określenia ilościowego opóźnienia zapłonu przy pomocy komory spalania o stałej objętości, która została opracowana przy założeniu zapłonu samoczynnego z zastosowaniem bezpośredniego wtrysku paliwa do sprężonego powietrza. Metoda może być zastosowana do paliw pochodzących z przeróbki ropy naftowej, łącznie z tymi, które zawierają FAME. Metodę można stosować również do średnich destylatów ropy naftowej i paliw, które nie pochodzą z przeróbki ropy naftowej.

W przedmiotowej metodzie próbka analityczna paliwa, którą poddaje się testowi, wtryskiwana jest do ładunku sprężonego powietrza w komorze spalania o stałej objętości. Odpowiednie czujniki identyfikują początek wtrysku paliwa oraz początek spalania dla każdego cyklu z pojedynczym wtryskiem. Sekwencja testowa skład się z 15 wstępnych cykli spalania i następnie realizowane są kolejne 32 dalsze cykle testowe w celu określenia czasu opóźnienia zapłonu. Określona na podstawie 32 cykli średnia wartość opóźnienia zapłonu ID stanowi podstawę obliczenia pochodnej liczby cetanowej DCN (*Derived Cetane Number*) według zależności [5]:

$$DCN = 4{,}460 + 186{,}6/ID \tag{2}$$

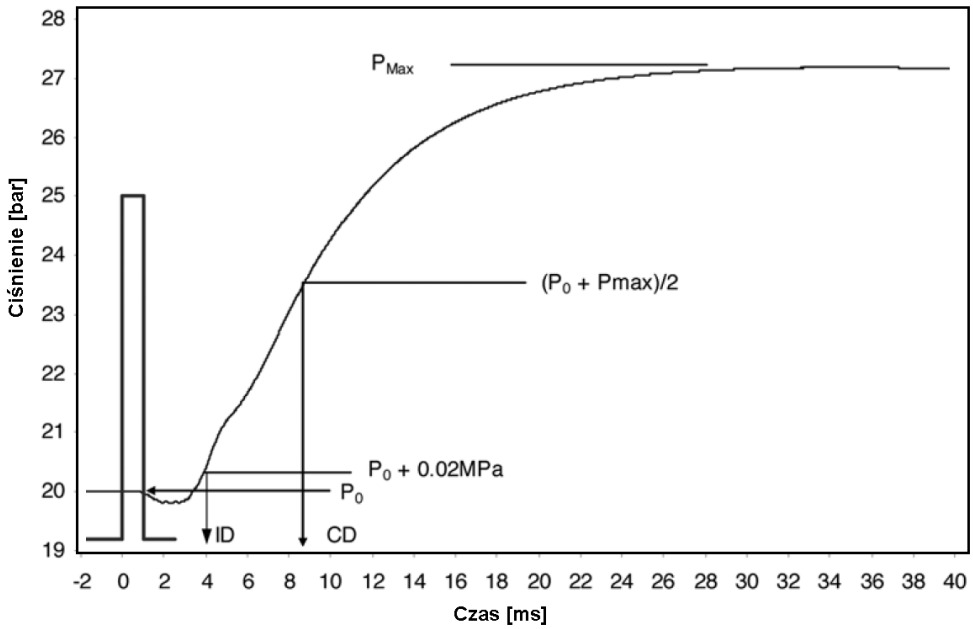


Rys. 1. Przykładowy przebieg zmian ciśnienia w komorze spalania i wzniosu iglicy [5]: 1 – początek wtrysku paliwa, 2 – początek spalania, 3 – ciśnienie początkowe w komorze spalania, 4 – okres opóźnienia zapłonu, 5 – przebieg wzniosu iglicy wtryskiwacza, 6 – przebieg ciśnienia w komorze spalania

Fig. 1. Example of a course of pressure variation in the combustion chamber and of the needle lift [5], 1 – start of fuel injection, 2 – start of combustion, 3 – initial pressure in the combustion chamber, 4 – ignition delay period, 5 – course of the needle lift, 6 – course of the pressure in the combustion chamber

Tak obliczona pochodna liczba cetanowa jest przybliżeniem LC oznaczonej według EN ISO 5165 z wykorzystaniem silnika testowego. Na rys. 1 przedstawiono przykładowy przebieg sygnału z czujnika ruchu iglicy oraz czujnika ciśnienia w komorze spalania. Czas jaki upływa od chwili punktu początku wzniosu iglicy (punkt 1) do punktu, w którym gwałtownie zaczyna narastać ciśnienie w komorze spalania (punkt 2), identyfikowany jest jako okres opóźnienia zapłonu.

Oznaczanie okresu opóźnienia na podstawie spalania w komorze o stałej objętości precyzuje również amerykańska norma ASTM D7668 – 10 „Standard Test Method for Determination of Derived Cetane Number (DCN) of Diesel Fuel Oils – Ignition Delay and Combustion Delay Using a Constant Volume Combustion Chamber Method". Metoda bazuje na spalaniu paliwa w komorze o stałej objętości z bezpośrednim wtryskiem paliwa do sprężonego, podgrzewanego powietrza syntetycznego. Sekwencja testowa składa się z 5 wstępnych cykli spalania. Ich celem jest m.in. oczyszczenie układu z paliwa wcześniej badanego. Następnie kolejno realizowanych jest 15 cykli testowych w celu określenia czasu opóźnienia zapłonu. Określona na podstawie 15 cykli średnia wartość opóźnienia zapłonu ID oraz czas przyrostu ciśnienia do wartości równej połowie przyrostu ciśnienia do wartości maksymalnej CD (rys. 2) w komorze stanowi podstawę obliczenia pochodnej liczby cetanowej DCN według zależności:



Rys. 2. Parametry służące określeniu pochodnej liczby cetanowej DCN [6]: ID – czas, jaki upłynął od pojawienia się sygnału sterującego wtryskiwaczem (zbocze narastające impulsu) do momentu, gdy ciśnienie w komorze wzrosło o 0,02 MPa powyżej ciśnienia początkowego P_0, CD – czas, jaki upłynął od pojawienia się sygnału sterującego wtryskiwaczem (zbocze narastające impulsu) do momentu gdy ciśnienie w komorze uzyskało wartość równą połowie sumy ciśnienia początkowego P_0 w komorze i ciśnienia maksymalnego p_{max} w cyklu

Fig. 2. Parameters used to determine the derivative of the cetane number DCN [6]: ID – passage of time since the appearance of the signal controlling the injection (impulse rising edge) until the moment, when the pressure in the chamber exceeded of 0.02 MPa the initial pressure P_0, CD – passage of time since the appearance of the signal controlling the injection (impulse rising edge) till the moment, when the pressure in the chamber get the value equal to half-sum of the initial P_0 in the chamber and the maximum cycle pressure p_{max}

$$\mathrm{DCN} = 11{,}162234 + 7{,}\frac{654674}{\mathrm{ID}} + 171{,}\frac{880479}{\mathrm{CD}} + \frac{-799{,}518995}{\mathrm{CD}^2} + 2835{,}\frac{510270}{\mathrm{CD}^3} + 15{,}147363 \cdot \frac{\mathrm{ID}}{\mathrm{CD}} \tag{3}$$

gdzie:

ID – czas, jaki upłynął od pojawienia się sygnału sterującego wtryskiwaczem (zbocze narastające impulsu) do momentu gdy ciśnienie w komorze wzrosło o 0,02 MPa powyżej ciśnienia początkowego P_0 (rys. 2),

CD – czas, jaki upłynął od pojawienia się sygnału sterującego wtryskiwaczem (zbocze narastające impulsu) do momentu gdy ciśnienie w komorze uzyskało wartość równą połowie sumy ciśnienia początkowego P_0 w komorze i ciśnienia maksymalnego p_{max} w cyklu (rys. 2).

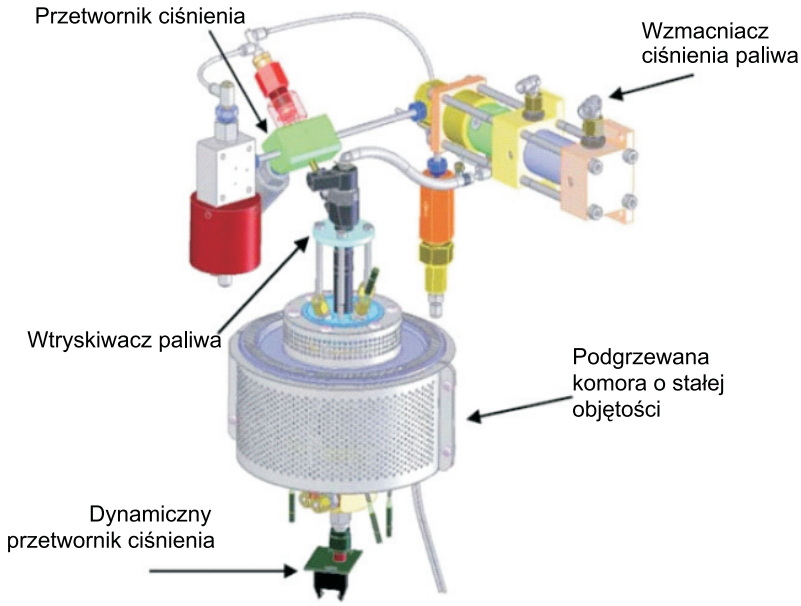
Przykładem aparatu, który umożliwia oznaczenie pochodnej liczby cetanowej według normy ASTM D7668 – 10, jest aparat CID 510 firmy Walter Herzog (rys. 3). W urządzeniu zastosowano system wtryskowy typu Common Rail. Elektronicznie sterowany wtryskiwacz CR z rozpylaczem wielootworkowym, może wtryskiwać do komory spalania paliwo pod ciśnieniem do 1500 bar. Na rys. 4 i 5 przedstawiono odpowiednio schemat układu wtryskowego aparatu CID 510 oraz widok jego komory spalania.

Znajdujący się na wyposażeniu bazy laboratoryjnej w Zakładzie Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Rzeszowskiej aparat CID 510 posłużył do wykonania badania mającego na celu określenie DCN handlowego oleju napędowego (ON_H), paliwa biodiesel (B100), czystego oleju napędowego bez biokomponentów (ON), paliwa B7 (mieszanina 93% ON 7% paliwa biodiesel) i mieszaniny 90% ON handlowego i 10% benzyny silnikowej, a także paliwa syntetycznego (PS). Wyniki tych badań przedstawiono na rys. 6.

Ponadto w celu określenia dokładności metody, po przeprowadzonej kalibracji urządzenia, przeprowadzono pomiary pochodnej liczby cetanowej dla paliw wzorcowych (LOW_CETANE, HIGH_CETANE, HIGH_CETANE_2 oraz mieszaniny 40% heksadekanu + 60% heptametylononanu oznaczonej jako 40_60), których liczba cetanowa była także wyznaczana metodą silnikową. Porównanie tych parametrów przedstawiono na rys. 7.

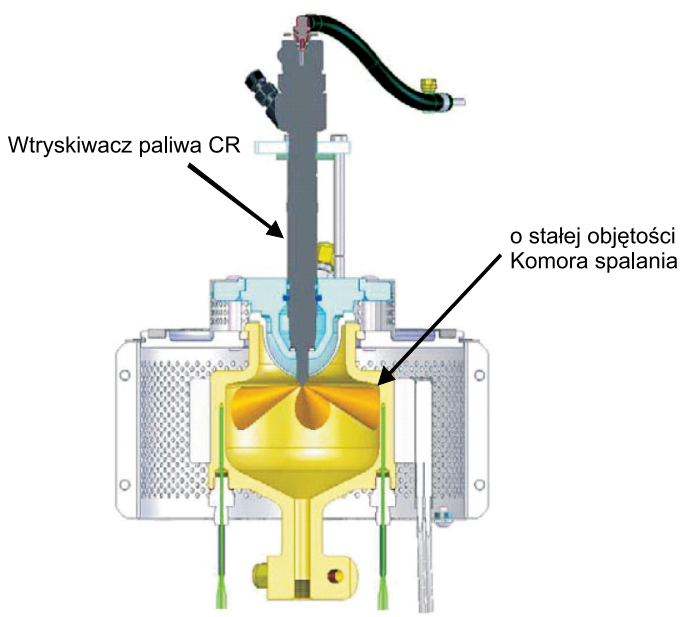
Rys. 3. Aparat do oznaczania pochodnej liczby cetanowej CID 510 firmy Walter Herzog [9]

Fig. 3. Apparatus for determining the cetane index derivative CID 510 produced by the firm Walter Herzog [9]



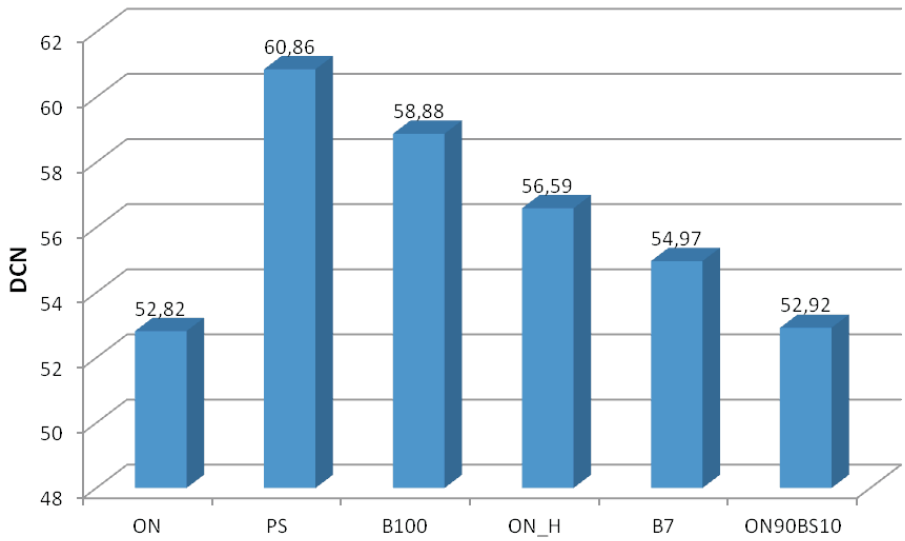
Rys. 4. Schemat układu wtryskowego aparatu CID 510 [2, 10]

Fig. 4. Diagram of the injection system of the apparatus CID 510 [2, 10]



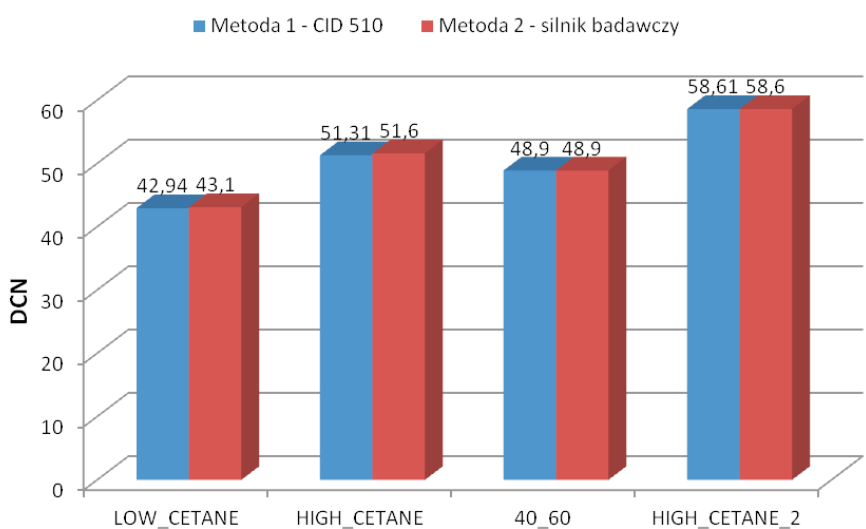
Rys. 5. Schemat komory spalania aparatu CID 510 [2, 9]

Fig. 5. Diagram of the combustion chamber of the apparatus CID 510 [2, 9]



Rys. 6. DCN różnych paliw; wyniki uzyskane za pomocą aparatu CID 510 firmy Walter Herzog

Fig. 6. DCN of different fuels; results achieved using CID 510 apparatus of Walter Herzog firm



Rys. 7. Porównanie DCN paliw wzorcowych uzyskanych za pomocą aparatu CID 510 firmy Walter Herzog oraz LC określonej na silniku badawczym

Fig. 7. Comparison of DCN of reference fuels obtained using CID apparatus of Walter Herzog firm and LC determined on a research engine

Jak wskazują przeprowadzone wyniki badań, paliwo syntetyczne pochodzące z granulatu gumowego cechuje się znacznie lepszymi właściwościami samozapłonowymi w stosunku do typowego oleju napędowego. Dalsze badania takiego paliwa będą miały na celu określenie pozostałych parametrów istotnych z punktu widzenia eksploatacji.

W tabeli 1 przedstawiono średnie wartości z 15 kolejnych wtrysków paliwa do komory spalania uzyskane podczas badania wartości parametru ID w [ms] i CD w [ms] dla analizowanych paliw.

Tabela 1

Średnie parametry pracy aparatu CID 510 przy określaniu DCN dla analizowanych paliw

Paliwo	ID [ms]	CD [ms]	p_0 [bar]	t_k [°C]	Δp_k [bar]	t_{ch} [°C]	t_{wtr} [μs]	p_{wtr} [bar]
ON	3,0287	4,5736	21,0047	586,7620	19,9533	50,0267	2500	999,1667
PS	2,9681	4,0674	19,8927	586,8347	20,3733	49,9133	2500	994,9067
B100	3,1160	6,6400	6,6260	576,1420	19,9067	50,9133	910	996,4867
ON_H	2,8332	4,2779	20,8900	586,8027	20,4067	50,2267	2500	1005,4200
B7	2,9079	4,3928	20,8627	586,7680	20,0400	49,9267	2500	1005,0800
ON90_BS10	2,8332	4,2779	20,8900	586,8027	20,4067	50,2267	2500	1005,4200
LOW_ CETANE	3,8397	5,8985	21,5267	586,7473	19,9267	50,2067	2500	989,1867
HIGH_CETANE	3,3311	4,7429	21,1187	586,7827	19,9600	50,0400	2500	989,6533
40_60	2,8707	4,8701	21,0500	586,7613	20,0000	50,1800	2500	1004,6067
HIGH_CETANE_2	2,8275	4,1560	20,6260	586,7660	19,8133	50,0200	2500	999,4267

Oznaczenia: p_0 – ciśnienie początkowe w komorze spalania; Δp_k – przyrost ciśnienia w komorze spalania; p_{wtr} – ciśnienie wtrysku paliwa; t_k – temperatura powietrza w komorze; t_{ch} – temperatura chłodzenia wtryskiwacza; t_{wrt} – czas wtrysku

3. Wnioski

Oznaczanie właściwości samozapłonowych paliw jest zasadniczym parametrem w aspekcie ich zastosowania do silnika o zmiennym stopniu sprężania. Wyniki badań wykazały, że w relacji do oleju napędowego handlowego paliwo syntetyczne (PS) oraz biodiesel (B100) charakteryzują się wyższymi wartościami liczby cetanowej. Czysty olej napędowy bez biokomponentów oraz badane paliwa B7 i ON90BS10 charakteryzują się niższymi wartościami liczby cetanowej.

Metoda silnikowa oznaczania LC jest droga i trudna do zastosowania. Wymaga bardzo drogiego w zakupie, eksploatacji i serwisowaniu silnika badawczego. Tańszym i znacznie mniej skomplikowanym sposobem oznaczania właściwości samozapłonowych paliw jest metoda polegająca na oznaczeniu pochodnej liczby cetanowej DCN poprzez spalanie w komorze o stałej objętości. Ten sposób oznaczenia pochodnej liczby cetanowej, który daje niemal identyczne wyniki jak w przypadku metody silnikowej, jest znacznie łatwiejszy do przeprowadzenia.

Przeprowadzone w Zakładzie Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych badania DCN dla wybranych paliw zastępczych na aparacie CID 510 w pełni potwierdzają jego funkcjonalność.

Literatura

[1] Baczewski K., Kałdoński T., *Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym*, WKŁ, Warszawa 2004.

[2] „Cetane ID 510 Automatyczny aparat do oznaczania pochodnej liczby cetanowej", Materiały firmowe Inkom Instruments.

[3] Norma PN-EN 590+A1:2011 Paliwa do pojazdów samochodowych. Oleje napędowe. Wymagania i metody badań.

[4] Norma PN-EN ISO 5165:2003 Przetwory naftowe. Oznaczanie właściwości zapłonowych olejów napędowych. Metoda silnikowa oznaczania liczby cetanowej.

[5] Norma PN-EN 15195:2009 Ciekłe przetwory naftowe. Oznaczanie opóźnienia zapłonu i pochodnej liczby cetanowej (DCN) paliw ze średnich destylatów przez ich spalanie w komorze o stałej objętości.

[6] Norma ASTM D7668 – 10 Standard Test Method for Determination of Derived Cetane Number (DCN) of Diesel Fuel Oils – Ignition Delay and Combustion Delay Using a Constant Volume Combustion Chamber Method.

[7] TD PPA – Wielofunkcyjny analizator oleju napędowego i paliwa lotniczego. Instrukcja obsługi, Opracowanie: Inkom Instruments.

[8] Woś P., Jakubowski M., *Silnik tłokowy o zmiennym stopniu sprężania*, Zgłoszenie patentowe nr 389951, Biuletyn Urzędu Patentowego RP, nr 13/2011 (978), Warszawa 20 czerwca 2011, 27.

[9] PAC (http://www.paclp.com).

[10] INKOM Instruments (http://www.inkom.com.pl).