

Hubert KUSZEWSKI, Artur JAWORSKI, Adam USTRZYCKI

WYKORZYSTANIE KOMORY SPALANIA O STAŁEJ OBJĘTOŚCI DO BADANIA WPŁYWU TEMPERATURY OŚRODKA GAZOWEGO NA WŁAŚCIWOŚCI SAMOZAPŁONOWE RME

Streszczenie

Celem badań, których wyniki zamieszczono w niniejszym artykule, było określenie wpływu temperatury ośrodka gazowego na właściwości samozapłonowe estrów metylowych oleju rzepakowego (RME). Właściwości samozapłonowe określono na podstawie okresu opóźnienia samozapłonu i okresu opóźnienia spalania. W badaniach wykorzystano urządzenie badawcze z komorą spalania o stałej objętości. Podczas kolejnych etapów badań, zmianie podlegała jedynie temperatura ścianek komory spalania. Badania pozwoliły m.in. na ilościowe określenie wartości okresu opóźnienia samozapłonu, przy zachowaniu stałych wartości pozostałych parametrów związanych z wtryskiem paliwa.

WSTĘP

Powszechnie wiadomo, że środki transportu samochodowego mają znaczący udział w emisji gazu cieplarnianego nie tylko w Europie, ale także na świecie. Jednym z działań podejmowanych w celu ograniczenia tego negatywnego oddziaływania jest dążenie do zwiększenia wykorzystania paliw alternatywnych. Komisja Europejska określiła wykorzystanie paliw ze źródeł odnawialnych na poziomie 20 % do roku 2020, a udział biopaliw w sektorze transportu na 10 % [4].

Popularnym paliwem alternatywnym, które brane jest pod uwagę głównie jako biokomponent paliw do silników o zapłonie samoczynnym, są estry metylowe wyższych kwasów tłuszczowych (FAME, Fatty Acid Methyl Esters). Z uwagi na stosunkowo dobre warunki uprawy rzepaku, w Polsce najczęściej wykorzystywane są estry metylowe wyższych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego (RME, Rape-seed Oil Methyl Esters) [3].

Z uwagi na dążenie do zwiększania udziału FAME w oleju napędowym, istotne jest precyzyjne określanie właściwości tego biokomponentu. Spośród wielu wymagań normatywnych stawianym tego typu paliwu, jednym z najistotniejszych z punktu widzenia realizacji procesu roboczego silnika o zapłonie samoczynnym, jest odpowiednia wartość liczby cetanowej (LC) lub pochodnej liczby cetanowej (DCN, Derived Cetane Number), które należą do parametrów jakościowych paliw determinujących ich właściwości samozapłonowe. Opracowanie systemu spalania silnika, który uwzględni właściwości samozapłonowe paliwa, może jednak wymagać bardziej dokładnego określenia tego zjawiska, niż tylko za pomocą oznaczenia LC, czy DCN. Istotne może być np. zbadanie, jak na właściwości samozapłonowe danego paliwa, określane przez okres opóźnienia samozapłonu, oddziałują parametry związane z wtryskiem paliwa, takie jak ciśnienie wtrysku paliwa, czas trwania wtrysku, czy ciśnienie ośrodka gazowego, do którego realizowany jest wtrysk. Zbadanie takiego oddziaływania jest trudne do realizacji przy wykorzystaniu silnika spalinowego ze względu na szereg czynników uniemożliwiających zachowanie stałych wartości parametrów, które w danym badaniu nie podlegają analizie. Znacznie większe możliwości w tym zakresie daje wykorzystanie komory spalania o stałej objętości (CVCC, Constant Volume Combustion Chamber), przy czym niektóre z tych rozwiązań umożliwiają normatywne określanie DCN.

Istnieje szereg opracowań, w których autorzy przedstawiają wyniki badań właściwości samozapłonowych paliw, w trakcie któ-

rych wykorzystano komorę spalania o stałej objętości [2,5,6,7,9,10,13]. Przykładem mogą być wyniki badań przedstawione przez Hu i innych [7] dotyczące samozapłonu n-heptanu oraz izooktanu. W czasie badań zmieniano ciśnienie wtrysku paliwa, temperaturę oraz ciśnienie powietrza w komorze. Do identyfikacji okresu opóźnienia samozapłonu wykorzystano rejestrowany przebieg ciśnienia w komorze spalania. Okres opóźnienia samozapłonu był mierzony jako czas od chwili początku wtrysku paliwa (w tym celu wykorzystano początek wzniosu iglicy wtryskiwacza), do chwili gwałtownego przyrostu ciśnienia w komorze spalania. Do określenia chwili wystąpienia gwałtownego przyrostu ciśnienia w komorze spalania posłużono się metodą stycznej. Ten sposób określania gwałtownego przyrostu ciśnienia w komorze spalania został też scharakteryzowany w pracy [12]. Lee i Baik [11] wykorzystali komorę spalania o stałej objętości do analizy procesu spalania różnych paliw pochodzenia roślinnego. Okres opóźnienia samozapłonu analizowali na podstawie zarejestrowanego przebiegu ciśnienia w komorze spalania oraz na podstawie zarejestrowanych obrazów rozwoju strugi paliwa i płomienia. Ghojel i Tran [6] wykorzystali natomiast komorę o stałej objętości do badania procesu samozapłonu emulsji oleju napędowego z wodą.

W niniejszym artykule wykorzystano metodę CVCC do badania oddziaływania temperatury ośrodka gazowego na właściwości samozapłonowe RME. W tym celu wykorzystano dostępne na rynku urządzenie CID510 z komorą spalania o stałej objętości, którego zasadniczą funkcją jest oznaczanie DCN zgodnie z procedurą zawartą m.in. w normie ASTM D7668 [1].

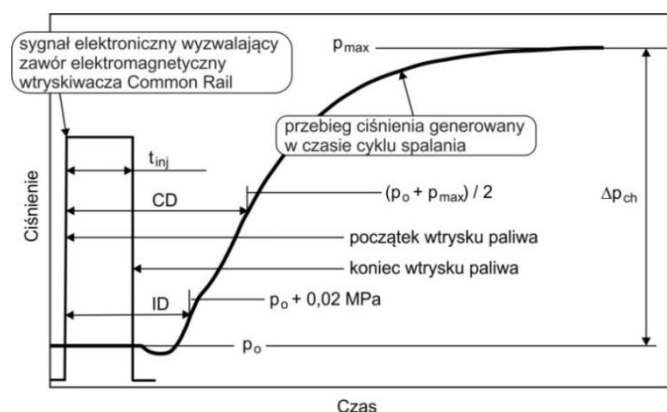
1. STANOWISKO BADAWCZE I METODYKA BADAŃ

Schemat budowy urządzenia badawczego jest przedstawiony w pracach [1,8]. Zasadniczymi elementami urządzenia badawczego, poza systemem automatyki i sterowania, są podgrzewana komora spalania o stałej objętości wynoszącej 0,473 dm³, wtryskiwacz paliwa typu Common Rail, układ hydrauliczny ze wzmacniaczem ciśnienia, układ doprowadzenia paliwa, układ doprowadzenia powietrza, układ odprowadzenia spalin oraz układ chłodzenia wtryskiwacza. Komora spalania otoczona jest płaszczem grzewczym, który zapewnia odpowiednią temperaturę powietrza syntetycznego wypełniającego komorę. Czujniki temperatury umieszczone są w ściankach komory, ale ponieważ komora jest ogrzewana, przez cały czas włączenia urządzenia badawczego, a dodatkowo przed kolejnymi wtryskami upływa określony czas, można założyć, że tempera-

tura powietrza syntetycznego wypełniającego komorę, odpowiada rejestrowanej temperaturze ścianek komory. W dolnej części komory zamontowany jest dynamiczny czujnik ciśnienia. Na przewodzie doprowadzającym powietrze do komory znajduje się natomiast czujnik ciśnienia statycznego.

Badania przeprowadzono przy założeniu, że poszczególne kroki pomiarowe różnią się między sobą jedynie temperaturą powietrza syntetycznego wypełniającego komorę spalania. Badania zrealizowano dla sześciu wartości temperatury powietrza syntetycznego t_{chz} – od 540 do 640 °C, co 20 °C.

Pojedynczy krok pomiarowy, dla każdej z przyjętych temperatur ośrodka gazowego, składał się z 5 wstępnych cykli spalania oraz 15 cykli zasadniczych. Dla każdego cyklu, za pomocą czujnika dynamicznego, rejestrowane było ciśnienie w komorze spalania z częstotliwością próbkowania wynoszącą 25 kHz. Koniec rejestracji ciśnienia następował po 220 ms. Początek rejestracji ciśnienia w komorze odpowiada chwili pojawienia się impulsu sterującego cewką wtryskiwacza. Dla każdego z 15 zasadniczych cykli spalania rejestrowane są początkowe ciśnienie w komorze spalania p_o , przyrost ciśnienia w komorze w stosunku do ciśnienia początkowego Δp_{ch} , temperatura ścianek komory spalania t_{ch} , temperatura cieczy chłodzącej wtryskiwacz t_{co} oraz ciśnienie wtrysku paliwa p_{inj} . Następnie parametry te są uśredniane. Wszystkie wartości analizowanych ciśnień są to nadciśnienia w stosunku do ciśnienia otoczenia.



Rys. 1. Schemat oznaczania okresu opóźnienia samozapłonu (ID) oraz okresu opóźnienia spalania (CD)

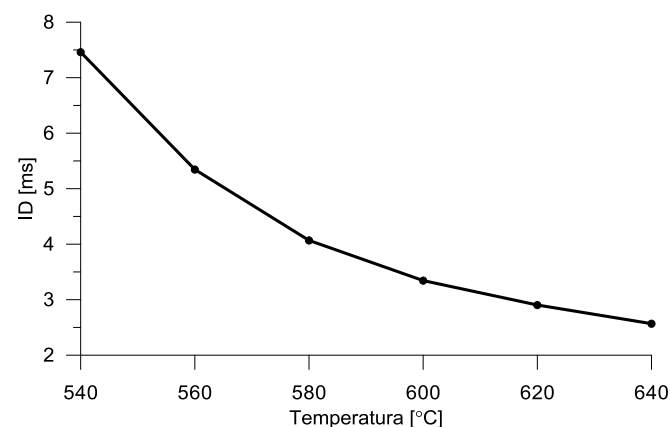
W badaniach wykorzystano estry metylowe wyższych kwasów tłuszczowych (RME), które spełniają wymagania normy PN-EN 14214. Ocenę właściwości samozapłonowych tego paliwa przeprowadzono na podstawie średnich wartości okresu opóźnienia samozapłonu (ID, Ignition Delay) oraz okresu opóźnienia spalania (CD, Combustion Delay). Wartości tych parametrów są wyznaczone przez oprogramowanie sterujące urządzeniem badawczym. Brane są pod uwagę średnie wartości z 15 zasadniczych cykli spalania, które wchodzi w zakres pojedynczego kroku pomiarowego.

Początek ID odpowiada wyzwoleniu sygnału sterującego zaworem elektromagnetycznym wtryskiwacza, natomiast za koniec tego

okresu przyjmuje się chwilę, w której ciśnienie w komorze spalania osiągnie wartość powyżej 0,02 MPa w stosunku do ciśnienia statycznego p_o . Czas wtrysku t_{inj} odpowiada w prezentowanej metodzie długości sygnału sterującego wtryskiwaczem. Okres opóźnienia spalania CD określany jest jako czas pomiędzy wyzwoleniem sygnału sterującego zaworem elektromagnetycznym wtryskiwacza a chwilą odpowiadającą osiągnięciu połowy wartości przyrostu ciśnienia w komorze spalania Δp_{ch} w stosunku do statycznego ciśnienia początkowego w komorze p_o . Przedstawiony na rysunku 1 schemat wyznaczania ID oraz CD jest zgodny z metodyką zawartą w [1].

2. WYNIKI BADAŃ

Wyniki pomiarów okresu opóźnienia samozapłonu ID oraz opóźnienia spalania CD zaprezentowano w tabeli 1 oraz na rysunkach 2 i 3. Jak widać, wzrostowi temperatury ośrodka gazowego towarzyszy skrócanie zarówno okresu opóźnienia samozapłonu, jak i okresu opóźnienia spalania. Jednocześnie można zauważyć, że zmiana wartości tych parametrów jest silniejsza w zakresie niższych wartości temperatur, które były brane pod uwagę. Większe wartości parametru CD w stosunku do ID wynikają natomiast z przyjętej metodyki określania tych parametrów (rysunek 1).



Rys. 2. Zależność okresu opóźnienia samozapłonu ID od temperatury ośrodka gazowego

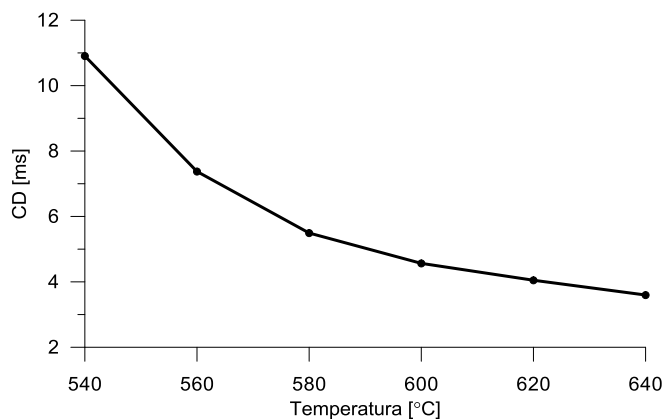
Jak wynika z rysunku 4, różnice pomiędzy czasem trwania CD i ID zmniejszają się dla wyższych temperatur. Należy też zwrócić uwagę, że zmniejszenie różnic pomiędzy CD i ID, rejestrowane dla wyższych temperatur ośrodka gazowego – co sprzyja lepszemu odparowaniu paliwa, wynika też po części z faktu, że dla wyższych temperatur odnotowywane są mniejsze wartości przyrostu ciśnienia w komorze spalania Δp_{ch} , co zilustrowano na rysunku 5.

Na rysunku 6 przedstawiono zarejestrowane w trakcie pomiarów przebiegi zmian ciśnienia w komorze spalania. Przebiegi obejmują zmiany ciśnienia w ciągu 20 ms od chwili wyzwolenia sygnału sterującego zaworem elektromagnetycznym wtryskiwacza. Poza zmniejszaniem wartości ciśnień maksymalnych w komorze wraz ze wzrostem temperatury ośrodka gazowego można zauważyć, że

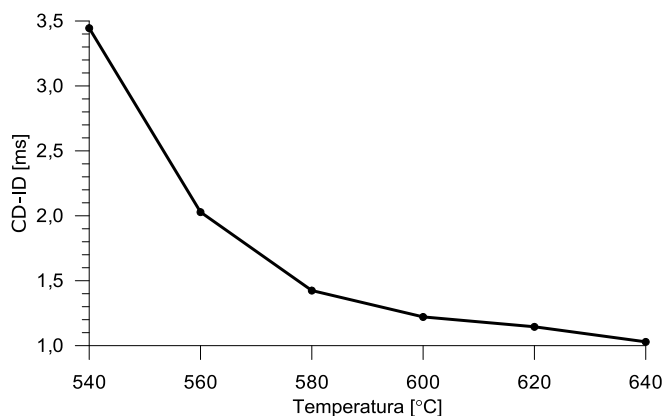
Tab. 1. Średnie wartości ID i CD oraz odpowiadające im wartości parametrów związanych z wtryskiem paliwa

Parametr t_{chz} [°C]	ID [ms]	CD [ms]	p_o [MPa]	Δp_{ch} [MPa]	t_{co} [°C]	t_{ch} [°C]	t_{inj} [ms]	p_{inj} [MPa]
540	7,4607	10,9061	2,00	1,93	50,9	540,3	2,5	99,5
560	5,3456	7,3743	2,00	1,92	50,6	560,3	2,5	99,9
580	4,0685	5,4930	2,00	1,90	50,3	580,3	2,5	100,3
600	3,3443	4,5657	2,00	1,84	50,6	600,3	2,5	100,2
620	2,9040	4,0494	2,00	1,80	50,3	620,3	2,5	100,1
640	2,5680	3,5974	2,00	1,76	50,7	640,3	2,5	100,3

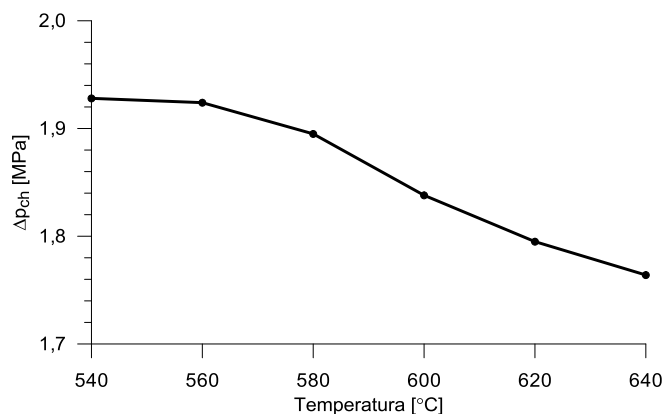
wyższym temperaturom towarzyszy gwałtowniejszy (bardziej stromy) przyrost ciśnienia. Można zatem wnioskować, że proces spalania mieszaniny paliwowo-powietrznej przy zastosowaniu RME przebiega gwałtowniej w przypadku skrócenia fizycznej części okresu opóźnienia samozapłonu. Skrócenie fizycznej części tego okresu wynika natomiast z lepszego odparowania paliwa, na co bezpośredni wpływ wywiera wyższa temperatura ośrodka gazowego, do którego odbywa się wtrysk. Można zatem przypuszczać, że w zakresie wyższych temperatur, decydujący wpływ na przebieg spalania wywiera chemiczna część okresu opóźnienia samozapłonu.



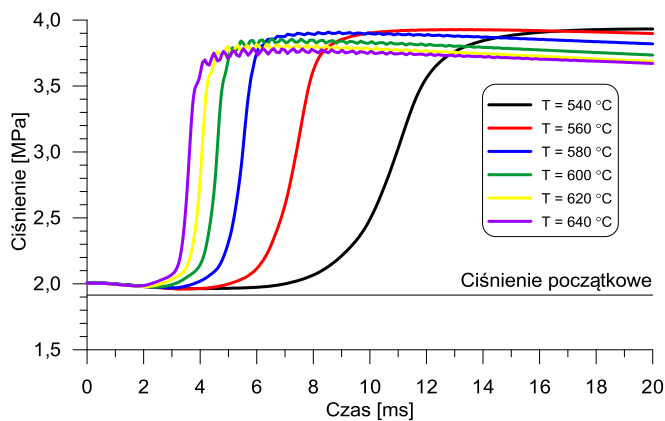
Rys. 3. Zależność okresu opóźnienia spalania CD od temperatury ośrodka gazowego



Rys. 4. Zależność różnicy okresu opóźnienia spalania CD i okresu opóźnienia samozapłonu ID od temperatury ośrodka gazowego



Rys. 5. Zależność przyrostu ciśnienia w komorze spalania Δp_{ch} od temperatury ośrodka gazowego



Rys. 6. Przebiegi zmian ciśnienia w komorze spalania dla analizowanych wartości temperatury ośrodka gazowego

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań właściwości samozapłonowych RME w warunkach spalania w komorze o stałej objętości, można sformułować następujące wnioski:

- przy wzroście temperatury ośrodka gazowego obserwuje się skracanie okresu opóźnienia samozapłonu i okresu opóźnienia spalania, przy czym zmiana tych parametrów jest silniejsza w zakresie niższych temperatur,
- dla wyższych temperatur ośrodka gazowego występują mniejsze różnice pomiędzy okresem opóźnienia spalania a okresem opóźnienia samozapłonu,
- dla wyższych temperatur ośrodka gazowego występują mniejsze wartości przyrostu ciśnienia w komorze spalania w stosunku do ciśnienia początkowego,
- w zakresie wyższych temperatur ośrodka gazowego obserwuje się bardziej stromy przebieg narastania ciśnienia w komorze spalania.

BIBLIOGRAFIA

1. ASTM D7668 – 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, 2014.
2. Berkhus S.K., Using a constant volume combustion chamber analyser for predicting derived cetane number of aviation turbine fuels. IASH 2009, the 11th International Conference on Stability, Handling and Use of Liquid Fuels, Prague, Czech Republic, October 18-22, 2009.
3. Bocheński C. I., Biodiesel. Paliwo rolnicze. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2003.
4. Communication from the Commission - Europe 2020: A strategy for smart, sustainable and inclusive growth. COM(2010) 2020 final.
5. Emberger P., Hebecker D., Pickel P., Remmele E., Thuncke K., Ignition and combustion behaviour of vegetable oils after injection in a constant volume combustion chamber. Biomass and Bioenergy 2015;78:48–61.
6. Ghojel J.I., Tran X.-T., Ignition characteristics of diesel-water emulsion sprays in a constant-volume vessel: effect of injection pressure and water content. Energy Fuels 2010;24:3860–3866.
7. Hu Z., Somers L.M.T., Davies T., McDougall A., Cracknell R.F., A study of liquid fuel injection and combustion in a constant volume vessel at diesel engine conditions. Fuel 2013;107:63–73.

8. Kuszewski H., Jaworski A., Lejda K., Ustrzycki A., Woś P., The study of derived cetane number for ethanol-diesel blends. *Combustion Engines*. 2015, 162(3), 928-932. ISSN 2300-9896.
9. Lapuerta M., Sanz-Argent J., Raine R.R., Heat release determination in a constant volume combustion chamber from the instantaneous cylinder pressure. *Applied Thermal Engineering* 2014;63:520–527.
10. Lapuerta M., Sanz-Argent J., Raine R.R., Ignition Characteristics of Diesel Fuel in a Constant Volume Bomb under Diesel-Like Conditions. Effect of the Operation Parameters. *Energy Fuels* 2014;28:5445–5454.
11. Lee S-W., Baik D-S., Experimental Study on Spray and Combustion Characteristics of Biodiesel Blends. *International Journal of Bio-Science and Bio-Technology* Vol.6, No.2 (2014):91–98.
12. Pękalski A.A., Theoretical and experimental study on explosion safety of hydrocarbons oxidation at elevated conditions. Ph.D. diss., Delft University of Technology, The Netherlands; 2004.
13. Rabl S., Davies T.J., McDougall A.P., Cracknell R.F., Understanding the relationship between ignition delay and burn duration in a constant volume vessel at diesel engine conditions. *Proceedings of the Combustion Institute* 2015;35:2967–2974.

THE USE OF CONSTANT VOLUME COMBUSTION CHAMBER TO STUDY OF EFFECT OF AMBIENT GAS TEMPERATURE ON SELF-IGNITION PARAMETERS OF RME

Abstract

The aim of the study presented in this article was to determine the effect of ambient gas temperature on the self-ignition properties of RME. The self-ignition properties were determined based on the ignition delay period and the combustion delay period. During the study a test analyser with the constant volume combustion chamber was used. During consecutive phases of study, only the temperature of the combustion chamber walls was changed. The study permits, among others, to quantitative determination of the ignition delay period at constant values of other parameters connected with fuel injection.

Autorzy:

dr inż. **Hubert Kuszewski** – Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Silników Spalinowych i Transportu

dr inż. **Artur Jaworski** – Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Silników Spalinowych i Transportu

dr inż. **Adam Ustrzycki** – Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Silników Spalinowych i Transportu