

Remigiusz Mruk
Katedra Organizacji i Inżynierii Produkcji
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

BADANIE PROCESÓW SPALANIA OLEJU NAPĘDOWEGO ORAZ BIOPALIW RZEPAKOWYCH

Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań procesu spalania oleju napędowego, estru oleju rzepakowego i surowego oleju rzepakowego z wykorzystaniem opracowanego stanowiska badawczego składającego się komory badawczej o stałej objętości oraz z układu sterującego wieloma parametrami roboczymi. Obróbka matematyczna danych pomiarowych oraz analiza statystyczna pozwoliła na określenie ilościowych modeli matematycznych przebiegów zmian czasu opóźnienia samozapłonu i ciśnienie spalania.

Słowa kluczowe: Common Rail, zapłon samoczynny, biopaliwa, spalanie, wtrysk paliwa, układy wtryskowe

Wykaz oznaczeń

- p_{cr} – ciśnienie w układzie wtryskowym [MPa],
 p_k – ciśnienie w komorze [MPa].
 p_s – ciśnienie spalania [MPa],
 T_k – temperatura początkowa w komorze badawczej [°C]
 t_o – czas opóźnienia samozapłonu [s].

Wprowadzenie

Stosowanie coraz większych ilości paliw pochodzenia biologicznego w silnikach wysokoprężnych z uwagi na odmiennosć ich cech fizyko-chemicznych prowadzi do zmian w procesie spalania w komorach silnika, które są optymalnie zaprojektowane dla paliw pochodzenia mineralnego [Zbielski 1998]. Przeprowadzenie badań eksperymentalnych powoli określić zjawiska zachodzące w czasie procesu spalania przy zmianie rodzaju paliwa oraz może być pomocne do optymalizacji parametrów pracy silników wysokoprężnych pod kątem zasilania ich biopaliwami.

Badania procesu spalania w silniku wysokoprężnym są bardzo kosztowne, obciążone błędami wynikającymi z chwilowych parametrów termo-dynamicznych i technicznych oraz odnoszą się do określonych silników o podobnej konstrukcji i parametrach pracy. Przedstawione w pracy badania przeprowadzone zostały na stanowisku z komorą doświadczalną, z możliwością zmiany określonych czynników wpływających na proces spalania (temperatura i ciśnienie powietrza w komorze, ciśnienie i wielkość dawki przy wielofazowym wtrysku paliwa, właściwości paliwa itd.).

Cel i zakres pracy

Celem pracy było badanie procesu spalania oleju napędowego, estru metylowego oleju rzepakowego oraz nieprzetworzonego oleju rzepakowego w komorze o stałej objętości, analiza na podstawie zebranych danych pomiarowych charakterystycznych parametrów procesu oraz próba modelowania matematycznego uwzględniająca zmienność wielu parametrów.

Zakres pracy obejmował:

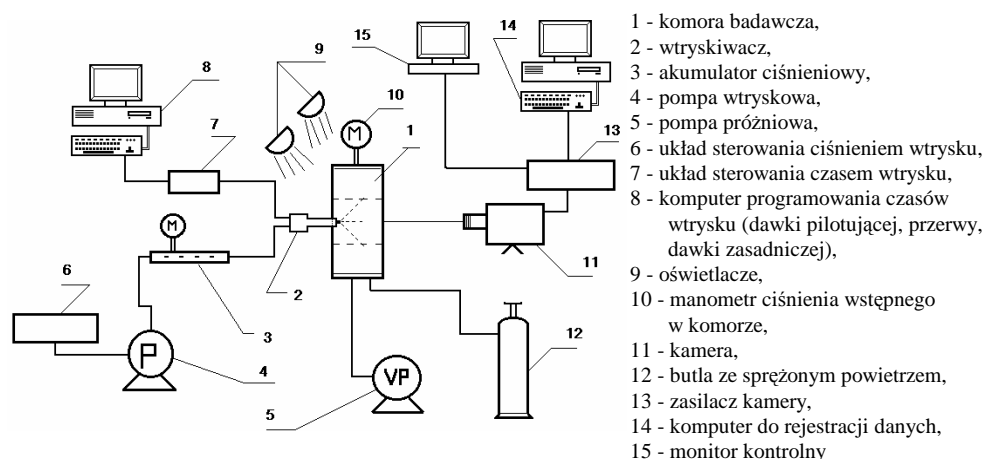
- opracowanie programu badań na stanowisku badawczym,
- opracowanie algorytmów sterujących pracą stanowiska,
- przeprowadzenie badań,
- analiza zebranego materiału badawczego,
- budowa modeli matematycznych określających wpływ parametrów roboczych stanowiska na proces spalania badanych paliw.

Metodyka

W badaniach procesu spalania wykorzystano stanowisko badawcze opracowane w ramach projektu badawczego. Na stanowisku zainstalowano wysokociśnieniowy, wielofazowy wtrysk paliwa oraz wykonano układ sterujący i układ pomiarowy (rys. 1.).

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem oleju napędowego, estru oleju rzepakowego i surowego oleju rzepakowego przy zmianie warunków pracy stanowiska badawczego:

- ciśnienia wtrysku: 140 MPa, 110 MPa, 80 MPa,
- ciśnienia początkowego w komorze: 0,5 MPa, 0,7 MPa, 0,9 MPa.
- temperatury początkowej w komorze: 400°C, 500°C, 600°C.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego wykorzystanego w badaniach procesu spalania

Fig. 1. Chart of a working station used in the research of combustion process: 1 – examining chamber, 2 – injector, 3 – pressure accumulator, 4 – injection pump, 5 – vacuum pump, 6 – control system for injection pressure, 7 – control system for injection time, 8 – computer for programming of injection times (piloting dose, break, main dose), 9 – lights, 10 – manometer measuring the initial pressure in the chamber, 11 – camera, 12 – compressed air cylinder, 13 – camera feeder, 14 – computer for data registering, 15 – control monitor

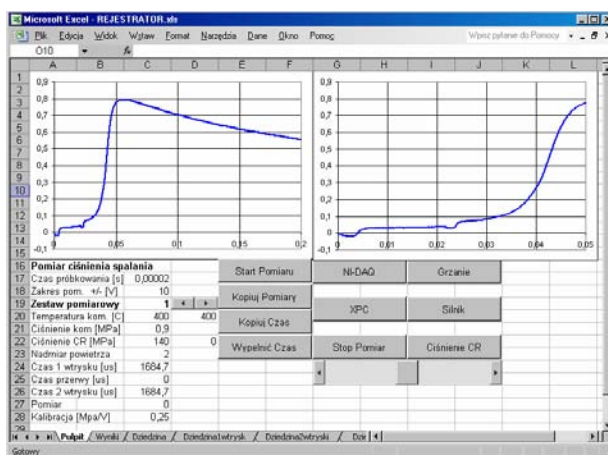
Na rysunku 2 przedstawiony został widok przygotowanego stanowiska badawczego wraz z aparaturą pomiarową.



Rys. 2. Widok stanowiska badawczego

Fig. 2. View of a research station

Opracowane oprogramowanie dla stanowiska badawczego składa się z części badawczej umożliwiającej wyzwolenie procesu wtrysku paliwa ze ściśle określonymi parametrami i śledzenie przebiegu ciśnienia w czasie procesu spalania oraz z części sterującej podstawowymi parametrami roboczymi. W przypadku modułów programu dotyczących procesu badawczego wykorzystano biblioteki NI-DAQ firmy National Instruments dołączone do przetworników analogowo cyfrowych.

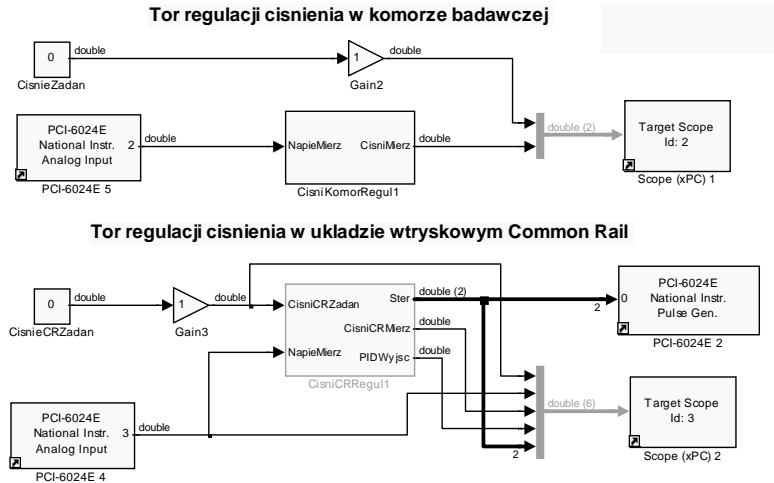


Rys. 3. Obraz programu sterującego procesem wtrysku paliwa do komory oraz rejestracji ciśnienia w komorze badawczej

Fig. 3. Picture of the program which controls the process of fuel injection into the chamber and recording of pressure in the research chamber

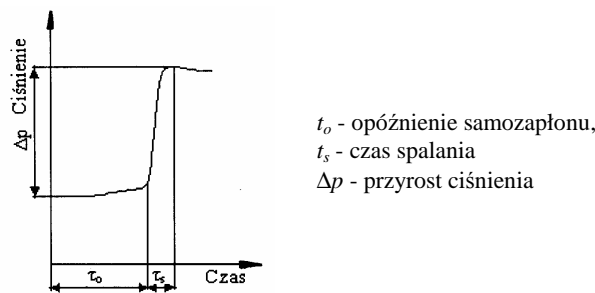
Do utworzenia aplikacji sterującej procesem badawczym został wybrany pakiet Microsoft Excel ze względu na poprawną współpracę z oprogramowaniem do sterowania modułów pomiarowych oraz ze względu na powszechnie stosowany format zapisu danych uzyskanych w czasie pomiarów. Na rysunku 3 został przedstawiony formularz aplikacji umożliwiającej przeprowadzenie pomiarów oraz rejestrację przebiegu ciśnienia spalania w komorze. Oprogramowanie części badawczej zostało utworzone w języku Visual Basic.

Regulacja wielu parametrów roboczych stanowiska badawczego, a szczególnie wartości ciśnienia w układzie Common Rail ze względu na krótkie czasy odpowiedzi systemu na zadane wymuszenia zewnętrzne (rzędu 10 ms) wymagała zastosowania szybkich metod obróbki sygnału celem wyliczenia wartości sterujących.



Rys. 4. Ogólny schemat opracowanego modelu funkcjonowania istotnych systemów sterowania i regulacji procesów roboczych na stanowisku badawczym
 Fig. 4. General chart of developed model of operation of important control system and control of working processes in the research station

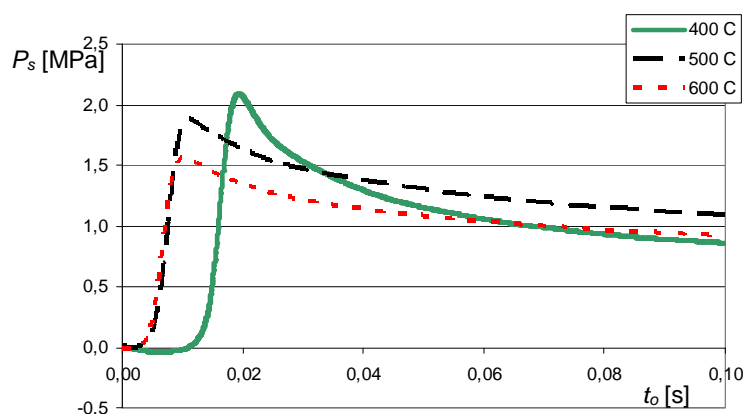
Do opracowania systemu sterowania układem Common Rail zostało wykorzystane środowisko MATLAB [Matlab 2001a] wraz z narzędziami Simulink, Real-Time Workshop i xPC Target [Matlab 2001b]. W środowisku tym zostały opracowane modele funkcjonowania poszczególnych torów umożliwiających regulację podstawowych parametrów roboczych układu (rys. 4). Analiza uzyskanych przebiegów zmian ciśnienia w komorze badawczej w czasie zgodnie z zaproponowanym algorytmem (rys. 5), pozwoliła na uzyskanie parametrów charakteryzujących procesy spalania.



Rys. 5. Parametry przyjęte do analizy przebiegów ciśnienia w czasie procesu spalania w korze badawczej
 Fig. 5. Parameters adopted for an analysis of pressure changes during combustion in the research chamber

Wyniki badań i ich analiza

Przeprowadzone badania procesu spalania w komorze badawczej pozwoliły na uzyskanie przebiegów zmian ciśnienia w funkcji czasu, których przykładowe przebiegi zostały przedstawione na rysunku 6.



Rys. 6. Przykładowe przebiegi uzyskane w czasie procesu spalania w komorze badawczej

Fig. 6. Examples of results obtained during combustion in a research chamber

Zebrane dane zostały poddane obróbce matematycznej, której celem było wyłonienie wartości parametrów charakteryzujących proces spalania.

Poniżej przedstawiono analizę dwóch najważniejszych wielkości charakteryzujących proces spalania:

- czasu opóźnienia samozapłonu t_o ,
- ciśnienia spalania p_s .

Na podstawie uzyskanych danych sporządzono macierz współczynników korelacji cząstkowych, pozwalającą określić wpływ badanych parametrów roboczych komory na przebieg zmian czasu opóźnienia samozapłonu t_o oraz ciśnienia spalania p_s (tab. 1). Analiza współczynników korelacji cząstkowych dla poszczególnych zmiennych niezależnych pozwoliła na pominięcie w dalszych rozważaniach wpływu zmian ciśnienia w układzie wtryskowym p_{cr} z uwagi na bardzo małą wartość r (wartości pogrubione).

Tabela 1. Wyniki oszacowania w postaci macierzy współczynników korelacji cząstkowych na podstawie danych

Table 1. Results of estimation in the form of a matrix of partial correlation coefficients on the basis of data

		T_k	p_k	p_{cr}
Olej napędowy	t_o	-0,624	-0,555	0,057
	p_s	-0,513	0,823	0,099
Estr metylowy	t_o	-0,798	-0,368	0,038
	p_s	-0,413	0,870	0,080
Olej rzepakowy	t_o	-0,956	-0,182	-0,053
	p_s	0,812	0,524	0,062

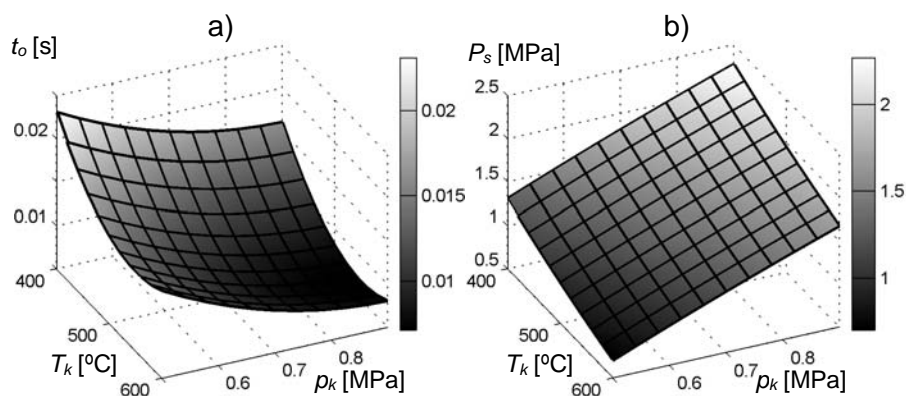
Z wykorzystaniem metody aproksymacji najmniejszych kwadratów uzyskano postacie modeli opisujących zmiany rozpatrywanych parametrów procesu spalania badanych paliw w funkcji zmiennych niezależnych (tab. 2), które dla pełnego zbioru zebranych danych pomiarowych charakteryzują się współczynnikiem R^2 w zakresie 0,85-0,97.

Tabela 2. Wyniki procesu doboru parametrów modeli regresyjnych do danych pomiarowych

Table 2. Results of the process of selection of parameters of regression models for measurement data

	Typ równania	R^2
Olej napędowy	$t_o = A_1 T_k^2 + A_2 T_k + A_3 p_k^2 + A_4 p_k + A_5$	0,850
	$p_s = A_1 T_k^2 + A_2 T_k + A_3 p_k^2 + A_4 p_k + A_5$	0,850
Estr metylowy	$t_o = A_1 T_k^2 + A_2 T_k + A_3 p_k^2 + A_4 p_k + A_5$	0,911
	$p_s = A_1 T_k^2 + A_2 T_k + A_3 p_k^2 + A_4 p_k + A_5$	0,911
Olej rzepakowy	$t_o = A_1 T_k^2 + A_2 T_k + A_3 p_k^2 + A_4 p_k + A_5$	0,968
	$p_s = A_1 T_k^2 + A_2 T_k + A_3 p_k^2 + A_4 p_k + A_5$	0,968

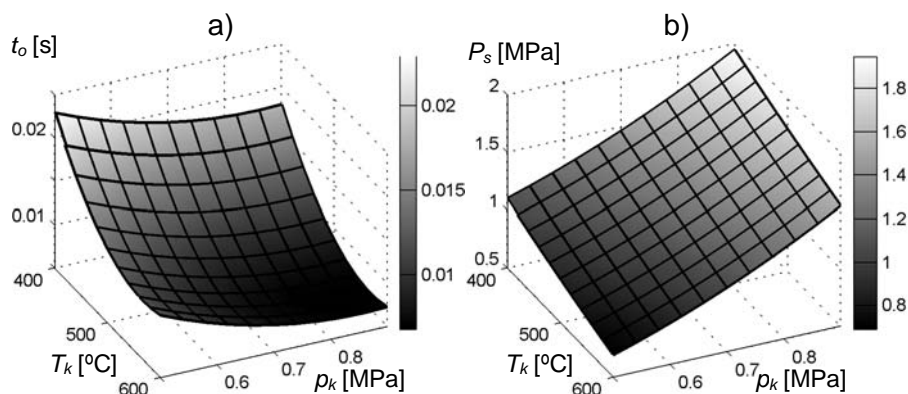
Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi odpowiednio zmian czasu opóźnienia samozapłonu i ciśnienia spalania. Na podstawie analizy modeli można stwierdzić, że głównym parametrem wpływającym na rozpatrywane wielkości jest temperatura początkowa w komorze badawczej. Natomiast ciśnienie w komorze ma zdecydowanie mniejszy wpływ.



Rys. 7. Powierzchnie przedstawiające zmiany uzyskane z wykorzystaniem modeli matematycznych: a) czasu opóźnienia samozapłonu t_o , a) ciśnienia spalania p_s dla oleju napędowego

Fig. 7. Surfaces which present changes obtained with application of mathematical models: a) self-ignition delay time t_o , a) combustion pressure p_s for diesel oil

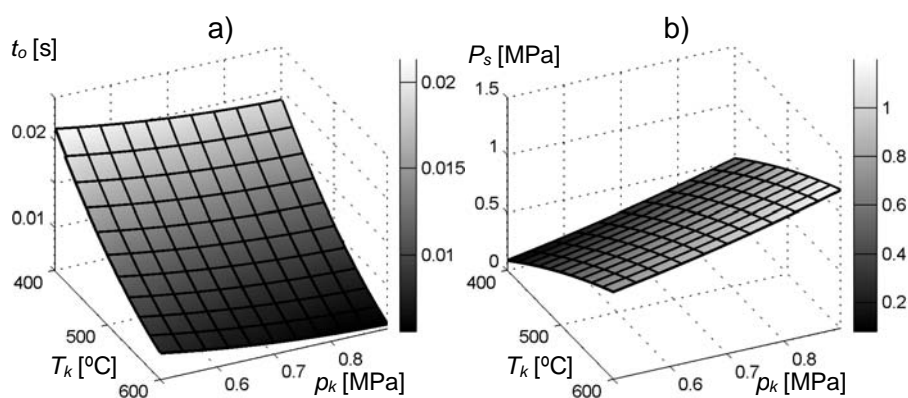
Zmiany parametrów procesu spalania estru oleju rzepakowego mają podobny charakter jak dla oleju napędowego (rys. 8). Także można stwierdzić, że głównym parametrem wpływającym na rozpatrywane wielkości jest temperatura początkowa w komorze badawczej. Natomiast ciśnienie w komorze ma zdecydowanie mniejszy wpływ.



Rys. 8. Powierzchnie przedstawiające zmiany uzyskane z wykorzystaniem modeli matematycznych: a) czasu opóźnienia samozapłonu t_o , a) ciśnienia spalania p_s dla estru oleju rzepakowego

Fig. 8. Surfaces which present changes obtained with application of mathematical models: a) self-ignition delay time t_o , a) combustion pressure p_s for rape oil ester

W przypadku surowego oleju rzepakowego przebieg zmian ciśnienia spalania ma zdecydowanie odmienny charakter od pozostałych paliw (rys. 9). Natomiast przebieg czasu opóźnienia samozapłonu nie różni się zbyt wiele od pozostałych przypadków. Stąd można stwierdzić, że głównym parametrem wpływającym na rozpatrywane wielkości jest temperatura początkowa w komorze badawczej. Natomiast ciśnienie w komorze ma zdecydowanie mniejszy wpływ.



Rys. 9. Powierzchnie przedstawiające zmiany uzyskane z wykorzystaniem modeli matematycznych: a) czasu opóźnienia samozapłonu t_0 , b) ciśnienia spalania p_s dla surowego oleju rzepakowego

Fig. 9. Surfaces which present changes obtained with application of mathematical models: a) self-ignition delay time t_0 , b) combustion pressure p_s for raw rape oil

Wnioski

1. Analiza statystyczna wykazała, że na przebieg procesów spalania w komorze badawczej największy wpływ miała temperatura początkowa. Natomiast ciśnienie w układzie wtryskowym można było pominąć w tworzonym modelu.
2. Przebiegi opóźnienia samozapłonu dla rozpatrywanych paliw mają zbliżony charakter.
3. Przebiegi ciśnienia spalania dla surowego oleju rzepakowego są zdecydowanie różne od pozostałych paliw.

Bibliografia

Hoffman K., Humeml K. 1997. Das Common-Rail- Einspritzsystem-ein neues Kapitel der Dieseleinspritztechnik, MTZ 58 (1997) 10.

Matlab 2001a. Real-Time Workshop Toolbox, The MathWorks Inc, Natick.

Matlab 2001b. xPC Target Toolbox, The MathWorks Inc, Natick.

Zbielski C. 1998. Tendencje w zasilaniu szybkoobrotowych silników o zapłonie samoczynnym, Monografia, Łódź.

RESEARCH OF COMBUSTION PROCESSES OF DIESEL OIL AND RAPE BIOFUELS

Summary

Results of a research of the process of combustion of diesel oil, ester of rape oil and raw rape oil with use of a research station made up of a research chamber with fixed volume and a control system which controls many working parameters are presented. Mathematical processing of measurement data and statistic analysis allowed to determine quantitative mathematical models of the course of changes of the time of delay of self-ignition and combustion pressure.

Key words: Common Rail, self-ignition, biofuels, combustion, fuel injection, injection systems