

## MODELOWANIE WTRYSKU PALIWA DO KOMORY SPALANIA W SILNIKU Z ZAPŁONEM SAMOCZYNNYM PRZY UŻYCIU ŚRODOWISKA AVL FIRE

*Marek Klimkiewicz, Krzysztof Błaszczuk, Remigiusz Mruk, Karol Tucki*  
*Katedra Organizacji i Inżynierii Produkcji*  
*Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie*

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono proces modelowania wtrysku paliwa do komory spalania w silniku z zapłonem samoczynnym uwzględniającego różne rodzaje paliw. Podczas tworzenia tych modeli posłużono się programem AVL Fire z dziedziny obliczeniowej mechaniki płynów (CFD – ang. Computational Fluid Dynamics). Analizie poddano zjawiska związane z przebiegiem wtrysku i jego parametrami. Wynikami przeprowadzonej symulacji były dane dotyczące wtrysku paliwa w formie dwuwymiarowej i trójwymiarowej. Obiekt, na którym przeprowadzono badania, to jednocylindrowy wysokoprężny silnik Farymann 18W z bezpośrednim wtryskiem paliwa Common Rail. Jako dane wejściowe wykorzystano parametry konstrukcyjne tej jednostki napędowej.

**Słowa kluczowe:** wtrysk paliwa, komora spalania, modelowanie, olej rzepakowy, silnik o zapłonie samoczynnym

### Wstęp

Ciągły postęp technologiczny w dziedzinie silników spalinowych wymusza również rozwój metod służących do ich projektowania. Dzisiejsze jednostki napędowe są bardzo skomplikowanymi układami elektroniczno-mechanicznymi. Systemy wtrysku bezpośredniego pracują pod bardzo wysokim ciśnieniem, a także w zakresie bardzo małych tolerancji wykonania. Także miniaturyzacja powoduje wzrost znaczenia nawet najmniejszych elementów konstrukcyjnych. Praca inżynierów skupia się na znalezieniu „złotego środka” pomiędzy osiąganymi, oddziaływaniem na środowisko, a kosztami generowanymi przez silnik. Skutkiem ww. czynników jest wzrost znaczenia właściwości paliw. Dążenie do zmniejszenia zużycia paliwa oraz oddziaływania na środowisko przyczynia się do wykorzystywania paliw alternatywnych. Najkorzystniejszym zamiennikiem paliw konwencjo-

nalnych byłyby takie, które nie wymagają zmian konstrukcyjnych silników (Kuszewski i Lejda, 2006; He i Bao, 2003; Bocheński, 2005).

W Polsce do silników z zapłonem samoczynnym stosuje się estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego. Otrzymuje się je w procesie transestryfikacji, polegającym na chemicznej reakcji pomiędzy trójglicerydami oleju roślinnego z alkoholem metylowym w obecności katalizatora. Surowcem do otrzymywania estrów są nasiona rzepaku. Ze względów ekonomicznych i technicznych w procesie transestryfikacji stosuje się alkohol etylowy (Sapiński, 1999; Wcisło, 2003). Otrzymywane wówczas paliwo może być stosowane do zasilania silników o zapłonie samoczynnym w czystej postaci lub w mieszaninach z olejem napędowym. Zaletami paliw roślinnych jest ich odnawialność, biodegradowalność, a także ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery. W celu zasilania współczesnych silników paliwami rzepakowymi konieczne są badania m.in. nad zmianami wskaźników pracy silnika, zużyciem elementów, niezawodnością pracy, ustaleniem optymalnych parametrów i innych. Umożliwi to zapewnienie wymaganej jakości paliw roślinnych (Drosio i inni, 2011; Dzieniszewski, 2006; Bocheńska i inni, 2008).

Skomplikowana budowa układów wtryskowych wymusza rozpatrywanie dużej liczby parametrów technicznych jakie należy zadać podczas etapu projektowania. W celu ułatwienia tej pracy stosowane są programy z dziedziny obliczeniowej mechaniki płynów (CFD – ang. Computational Fluid Dynamics). Analizują przebieg i zachowanie się termodynamicznych układów w precyzyjny i szybki sposób. Narzędziem wykorzystywanym podczas badań było środowisko AVL Fire, służące między innymi do analizy procesów zachodzących w silnikach spalinowych. Użytkownik może przeprowadzić symulację z dużym stopniem wierności. Dzięki wykorzystaniu modelu ma możliwość zredukowania kosztów oraz skrócenia czasu podejmowania decyzji.

## Cel i zakres pracy

Celem pracy było opracowanie projektu symulacyjnego wtrysku paliwa do komory spalania silnika w oparciu o rzeczywiste właściwości obiektu badawczego. Ponadto, przeprowadzenie procesu symulacji mającej na celu uzyskanie informacji na temat zachowania się wybranego paliwa podczas wtrysku do komory silnika z wykorzystaniem środowiska AVL Fire. Podczas budowy projektu symulacyjnego wykorzystano parametry konstrukcyjne oraz eksploatacyjne jednostki napędowej, tj. silnika Farymann 18W o zapłonie samoczynnym, do którego w ramach prac badawczo-rozwojowych zamontowano układ wtryskowy Common Rail.

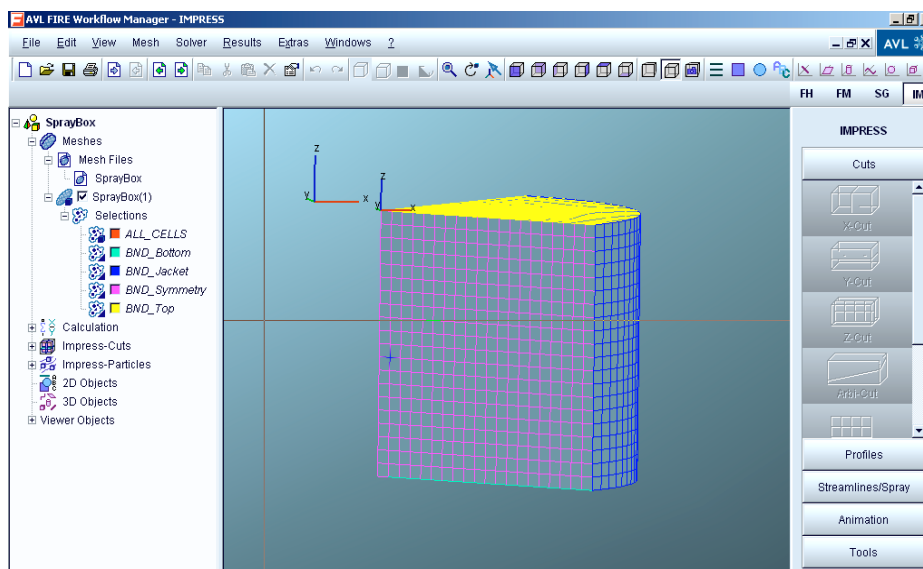
Zakres pracy obejmował:

- Uzyskanie zbioru parametrów silnika badawczego, niezbędnych do budowy oraz uruchomienia symulacji poprzez analizę dostępnych dokumentacji producenta oraz pomiarów na rzeczywistym obiekcie;
- Utworzenie siatki geometrycznej komory spalania z uwzględnieniem przemieszczania się tłoka w cylindrze silnika, ustalenie wielkości zbioru procesów symulacyjnych dla potrzeb uzyskania obrazu rozpylenia paliwa, ustalenie parametrów zastosowanego podczas symulacji wtryskiwacza (ilość i średnica otworków, kąty wypływu paliwa w stosunku do siatki geometrycznej przyjętej jako układ odniesienia);

- Określenie właściwości kluczowych elementów utworzonej siatki geometrycznej (selekcja obszarów ścian tulei cylindra silnika, powierzchni głowicy oraz tłoka);
- Przeprowadzenie procesu symulacji dla ustalonych parametrów wejściowych;
- Opracowanie projektu symulacyjnego umożliwiającego prezentację wyników (Cisek, 2007; Lipski i Orliński, 2007; Rychter i Teodorczyk, 1990): opracowanie sposobu prezentacji wyników zmian parametrów symulowanych – wykresy dwuwymiarowe, przedstawienie procesów zachodzących podczas wtrysku paliwa z uwzględnieniem geometrii modelu.

## Metodyka badań

Budowę projektu symulacyjnego procesu rozpylania paliwa w silniku samoczynnym przeprowadzono przy użyciu środowiska AVL Fire, zawierającego wiele niezależnych aplikacji typu CFD (Computational Fluid Dynamics) wykorzystujących metodę elementów skończonych. Metoda ta charakteryzuje się podziałem objętości całkowitej na określoną ilość elementów, w których wykonywane są obliczenia numeryczne. Skutkiem takiego podziału jest utworzenie siatki numerycznej obliczanej przez algorytmy numeryczne środowiska z uwzględnieniem ustalonych przez użytkownika parametrów symulowanych obiektów oraz wybranych procesów fizyko-chemicznych wchodzących w skład projektu symulacyjnego. Na rysunku 1 przedstawiono obraz aplikacji Workflow Manager wraz z otwartym projektem symulacyjnym.



Rysunek 1. Widok aplikacji Workflow Manager i projektu symulacyjnego  
Figure 1. The view of Workflow Manager application and simulation design

Obiektem, na którym oparto budowę projektu symulacyjnego był silnik wysokoprężny Farymann 18W, posiadający jeden cylinder pracujący w pozycji pionowej o pojemności skokowej  $290 \text{ cm}^3$ , średnicy cylindra  $82 \text{ mm}$  i skoku tłoka  $55 \text{ mm}$ . W układzie zasilania paliwem wykorzystano komponenty układu Common Rail firmy Bosch. Pojemność komory spalania w tłoku wynosiła  $10,6 \text{ cm}^3$ , stopień sprężania 20. Dysza badanego wtryskiwacza to sześć otworów o średnicy  $0,22 \text{ mm}$ , kąt stożka jaki tworzy wtryskiwane paliwo równa się  $150^\circ$ . Powyższe parametry zostały zadane do programu AVL Fire podczas pracy nad tworzeniem zbioru danych niezbędnych do przeprowadzenia symulacji wtrysku paliwa.

## Wyniki badań

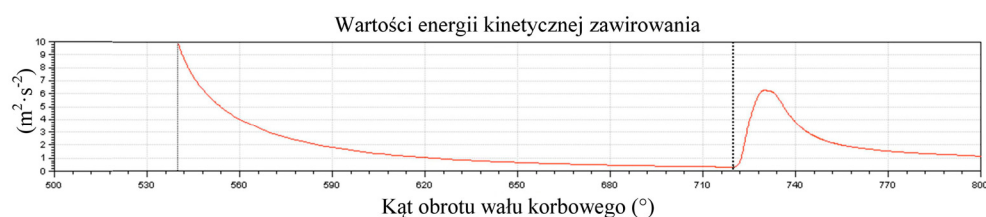
Poniżej przedstawiono wybrane wyniki procesu symulacji wtrysku paliwa z wykorzystaniem opracowanego modelu w środowisku AVL Fire. Przedstawione wyniki obejmują etapy procesu wtrysku paliwa od rozpoczęcia do jego zakończenia. Poszczególne grafiki przedstawiają zmiany wybranych własności fizyko-chemicznych w funkcji kąta obrotu wału korbowego. Zobrazowanie przebiegu procesu wtrysku umożliwia śledzenie zmienności zadanych parametrów podczas pracy silnika. Proces wtrysku paliwa (otwarcie kanałów) w końcu wtryskiwacza został zdefiniowany w zakresie  $719^\circ$ - $734^\circ$  obrotu wału korbowego.

W pierwszej kolejności zostały przedstawione wyniki 2D w postaci wykresów stworzonych za pomocą środowiska AVL Fire dla oleju napędowego, wybranego z bazy danych standardowych paliw zawartej w oprogramowaniu (lepkość kinematyczna  $2,87 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , gęstość  $836 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ). Na rysunku 2 przedstawiono przebieg zmian wskaźnika rozpraszania w funkcji kąta obrotu wału korbowego, który może być pomocny do oszacowania średnich wartości szybkości rozchodzenia się drobin paliwa w obszarze objętym symulacją. Jak wskazuje wykres, bezpośrednio po rozpoczęciu wtrysku paliwa, z pewnym opóźnieniem w czasie uzyskujemy maksymalną wartość omawianego wskaźnika. Następnie, po osiągnięciu wartości maksymalnej, mimo zasilania komory ciągle wtryskiwanym paliwem, wskaźnik ten zaczyna się zmniejszać. Po zamknięciu wtryskiwacza wartość wskaźnika rozpraszania gwałtownie maleje asymptotycznie do zera.



Rysunek 2. Wartości wskaźnika rozpraszania w funkcji kąta obrotu wału korbowego  
Figure 2. The values of the dispersion as a function of crank angle

W przypadku analizy przebiegów zmian wartości energii kinetycznej zawirowania uży- skano podobne przebiegi jak dla omawianego powyżej wskaźnika rozpraszania (rysunek 3).



Rysunek 3. Wartości energii kinetycznej zawirowania w funkcji kąta obrotu wału korbowego  
Figure 3. The turbulence kinetic energy values as a function of crank angle

Na rysunku 4 został przedstawiony przebieg zmian wartości czasu zawirowania w funkcji kąta obrotu wału korbowego, który charakteryzuje się zdecydowanie odmiennym kształtem od rozpatrywanych powyżej wyników badań symulacyjnych. Wartość maksymalną tego parametru uzyskano na początku procesu wtrysku paliwa. Może to oznaczać, że sam proces wtrysku spowodował znaczne zmniejszenie wartości tego wskaźnika.

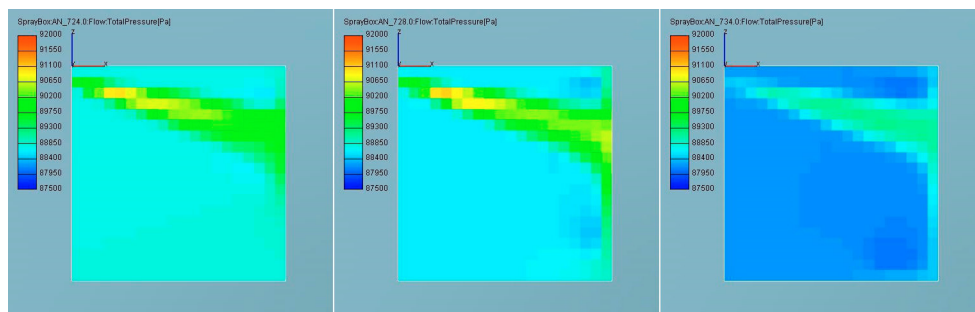


Rysunek 4. Wartości czasu zawirowania w funkcji kąta obrotu wału korbowego  
Figure 4. The values of turbulence time values as a function of crank angle

Oprócz wyników symulacji zawierających przebiegi średnie obserwowanych wielkości fizyko-chemicznych, przedstawionych dla wybranych parametrów, środowisko AVL Fire pozwala na obrazowanie zmian wartości chwilowych symulowanych parametrów z uwzględnieniem położenia punktu w siatce geometrycznej projektu. Wyniki uwzględniające geometrię przedstawiono poniżej w postaci wykresów trójwymiarowych z naniesionymi konturami obszaru symulacji.

Zaprezentowano wyniki dla wybranych wartości kątów obrotu wału korbowego, które najlepiej obrazują zmiany fizyko-chemiczne zachodzące podczas wtrysku paliwa.

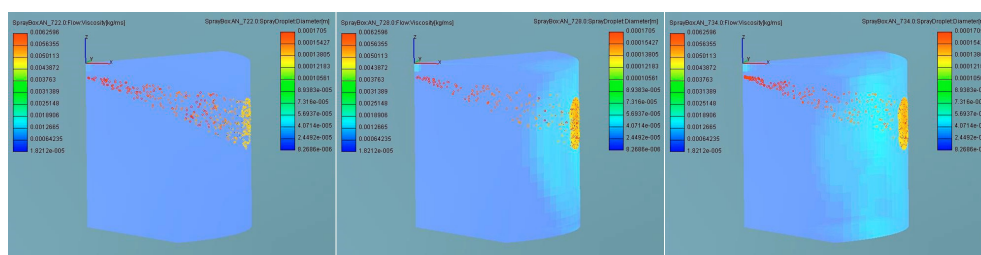
Na rysunku 5 zobrazowano chwilowe wartości ciśnienia w analizowanym obszarze z uwzględnieniem położenia geometrycznego w stosunku do przyjętego w projekcie układu odniesienia. W czasie wtrysku paliwa chwilowe ciśnienie w komorze w obszarze bezpośrednio stykającym się z strugą rozpylanego paliwa ulega niewielkiemu wzrostowi. Jest to związane z dynamicznym rozpraszaniem strugi posiadającej określoną energię kinetyczną.



Rysunek 5. Chwilowe ciśnienie w komorze spalania dla wybranych kątów obrotu wału korbowego

Figure 5. The instantaneous pressure in the combustion chamber for the selected crank angle

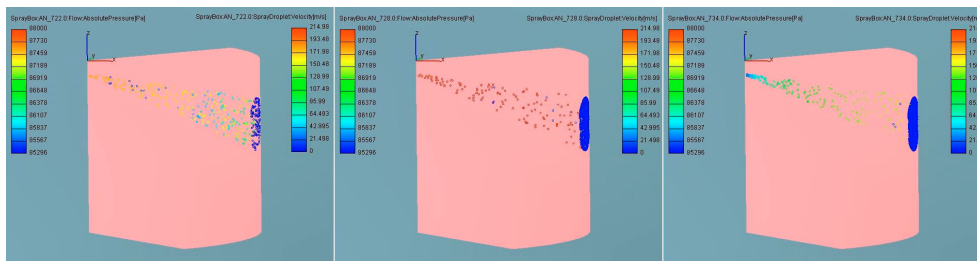
Inny sposób obrazowania wyników symulacyjnych został przedstawiony na rysunku 6, który zawiera chwilowe wartości średnicy kropeł rozpylanego paliwa (kolorowe koła obrazujące kolorem wartości średnicy) z uwzględnieniem ich położenia w stosunku do ustalonego układu odniesienia wraz ze zmienną wartością lepkości w komorze w postaci barwnego obszaru tła.



Rysunek 6. Wartości lepkości w komorze spalania oraz wielkości kropeł dla wybranych kątów obrotu wału korbowego

Figure 6. The viscosity values in the combustion chamber, and the droplet sizes for the selected crank angle

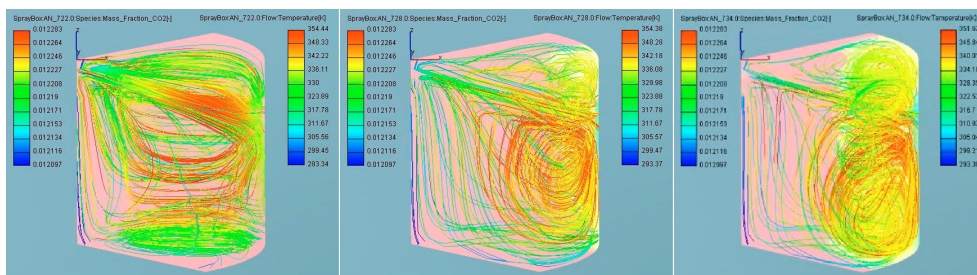
Podobny sposób obrazowania wyników badawczych zawierający elementy graficzne oraz tło, dla których zmiany kolorów oznaczają zmiany wartości obserwowanych parametrów, został przedstawiony na rysunku 7. Ilustruje on zmiany ciśnienia panującego w całej objętości komory spalania oraz zmiany prędkości kropeł wtrysku paliwa w zakresie  $720^{\circ}$ - $740^{\circ}$  kąta obrotu wału korbowego.



Rysunek 7. Wartości ciśnienia w komorze spalania oraz prędkość kropeł dla wybranych kątów obrotu wału korbowego

Figure 7. The pressure values in the combustion chamber and the speed drops for the selected crank angle

Wyniki przeprowadzonej symulacji zawierają oprócz wartości średnich i wartości chwilowych uwzględniających geometrię obszaru symulacyjnego, także informację o wymianach masowych dla założonych w projekcie czynników. Na rysunku 8 przedstawiono wybrane wykresy obrazujące przepływy strumieni masowych (linie – kolor odpowiada za zmianę wartości) wraz ze strumieniami przepływu ciepła w postaci pokolorowanego tła.

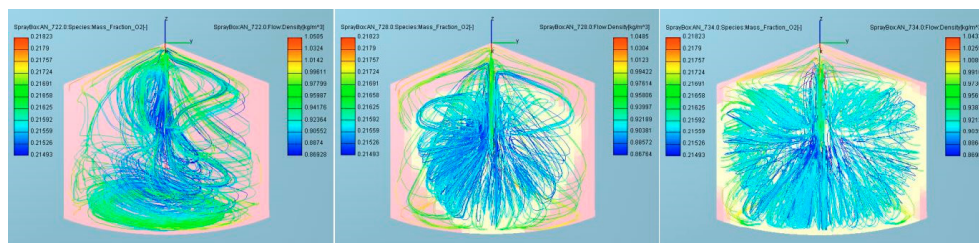


Rysunek 8. Przepływ masy  $CO_2$  w komorze spalania oraz przepływ strumieni ciepła dla wybranych kątów obrotu wału korbowego

Figure 8. The mass flow of  $CO_2$  in the combustion chamber and the flow of heat flows for the selected crank angle

Na rysunku 9 zostały przedstawione wybrane wyniki symulacji uwzględniające drogi przepływu  $O_2$  w komorze spalania oraz przepływ strumieni gęstości dla wybranych kątów obrotu wału korbowego.





Rysunek 9. Przepływ  $O_2$  w komorze spalania oraz przepływ strumieni gęstości dla wybranych kątów obrotu wału korbowego

Figure 9. The  $O_2$  flow in combustion chamber and streams flow density for the selected crank angle

## Posumowanie

Przeprowadzony proces badawczy, polegający na budowie modelu symulacyjnego rozpylania paliwa z wykorzystaniem środowiska AVL Fire dla wybranej rzeczywistej konstrukcji silnika wysokoprężnego z zamontowanym układem Common Rail, pozwolił na uzyskanie bardzo dużych ilości informacji opisujących zmiany wielu rozpatrywanych wielkości. Taki zbiór wyników pozwala na bardziej szczegółowy opis kluczowych procesów zachodzących podczas rozpylania paliwa.

Badania symulacyjne mogą być pomocne w ustalaniu parametrów pracy rzeczywistych obiektów bez wykorzystywania stanowiska badawczego. Prowadzenie symulacji pozwala na swobodne kształtowanie parametrów roboczych urządzeń technicznych i obserwowanie ich wpływu na model.

Opracowanie symulacji opartej o metody elementów skończonych pozwala na przyspieszenie prac konstrukcyjnych mających na celu optymalizację procesów towarzyszących pracy silnika z uwzględnieniem zasilania różnymi paliwami.

## Literatura

- Bocheńska, A.; Bocheński, C.; Oleszczak, P. (2008). The Appraisal of the Combustion Process in the Research Chamber for the Rapeseed Oil and Gasoline Mixtures. *KONES*, 4, 41-47
- Bocheński, C. (2005). *Paliwa i oleje smarujące w rolnictwie*. Warszawa, Wydawnictwo SGGW, ISBN 83-7244-717-9.
- Cisek, J. (2007). Wizualizacja wtrysku i spalania emulsji RME z wodą w silniku wysokoprężnym. *MOTROL*, 9, 49-55.
- Drosio, A.; Klimkiewicz, M.; Mruk, R. (2011). Energetic and Technical analysis of Winter Rapeseed production Technology. *MOTROL*, 13, 100-101.
- Dzieniański, G. (2006). Analiza możliwości zasilania silnika Diesla surowym olejem rzepakowym. *Inżynieria Rolnicza*, 12(87), 117-125.
- He, Y.; Bao, Y.D. (2003). Study on rapeseed oil as alternative fuel for a single-cylindre diesel engine. *Renewable Energy*, 28, 1447-1453.



- Kuszewski, H.; Lejda, K. (2006). Zwiększenie efektywności rozpylania paliwa rzepakowego przez modyfikację układu zasilania silnika ZS. *MOTROL*, 8A, 193-201.
- Lipski, R.; Orlński, S. (2007). Wpływ zasilania silnika o zapłonie samoczynnym węglowodorowymi i roślinnymi na stopień zadymienia spalin. *MOTROL*, 9, 103-110.
- Rychter, T.; Teodorczyk, A. (1990). Modelowanie matematyczne roboczego cyklu silnika tłokowego. Warszawa, PWN, ISBN 83-01-09642-X.
- Sapiński, A. (1999). Spalanie olejów roślinnych w silniku o zapłonie samoczynnym. 25th International Conference on Combustion Engines. *KONES*, 194-204.
- Wcisło, G. (2003). Możliwości zasilania olejem rzepakowym silników wysokoprężnych w pojazdach rolniczych. *Inżynieria Rolnicza*, 10(52). 43-49.

## MODELING OF FUEL INJECTION INTO THE COMBUSTION CHAMBER IN A COMPRESSION IGNITION ENGINE WITH AVL FIRE

**Abstract.** This paper presents the modeling of fuel injection into the combustion chamber in compression ignition engine with different fuel types. During creation of these models, software AVL Fire from Computational Fluid Dynamics was used. Process of injection and its parameters were analyzed. Two-dimensional and three-dimensional data on the fuel injection are the conducted simulation results. The study object was the single-cylinder, high-pressure Farymann 18W engine with Common Rail direct injection. Design parameters of the power unit were the input data.

**Key words:** fuel injection, the combustion chamber, modeling, rape oil, compression-ignition engine

**Adres do korespondencji:**

Remigiusz Mruk; e-mail: remigiusz\_mruk@sggw.pl  
Katedra Organizacji i Inżynierii Produkcji  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie  
ul. Nowoursynowska 166  
02-787 Warszawa