

Research on the mixture formation process in an SI engine fuelled by a propane-butane injection

Abstract: The article presents the research results of the air-fuel mixture formation in a propane-butane injected engine. The research object was a four-cylinder engine with an asymmetrical inlet system. The issues analysed included the impacts of the distance of a nozzle from an inlet valve axis and of an injection start angle on the concentration of toxic components in exhaust gases and the uniformity of fuel distribution in cylinders. The analysis is based on the results of the bench tests and of simulations using computational fluid dynamics (CFD). It was demonstrated that the distance between a nozzle and an inlet valve axis caused greater discrepancies in the composition of exhaust gases (concentration of CO, HC, NOx) than the modification of an injection start angle. The increased toxicity of exhaust gases was due to the changed filling process of each cylinder and the resultant varied mixture in these cylinders.

Key words: an internal combustion engine, a propane-butane supply system, an injection start angle, compressible flow modeling

Badania procesu tworzenia mieszanki w silniku o zapłonie iskrowym zasilanym wtryskiem gazu propan-butan

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań procesu tworzenia mieszanki paliwo-powietrznej w silniku zasilanym wtryskiem gazu propan-butan. Obiektem badań był czterocylindrowy silnik, wyposażony w asymetryczny układ dolotowy. Analizie poddano wpływ odległości dyszy wtryskowej od osi zaworu dolotowego oraz kąta początku wtrysku na stężenie składników toksycznych spalin i równomierność rozkładu paliwa w cylindrach. Powyższą analizę oparto o wyniki badań stanowiskowych wykonanych na hamowni silnikowej oraz o wyniki badań symulacyjnych z zastosowaniem numerycznej mechaniki płynów (CFD). Wykazano, że w odniesieniu do zmierzonych stężeń składników spalin (CO, HC, NOx) oddalenie dyszy wtryskowej od osi zaworu dolotowego spowodowało większe różnice w składzie spalin niż modyfikacja kąta początku wtrysku. Przyczyną zwiększenia toksyczności spalin okazała się zmiana procesu napełniania poszczególnych cylindrów silnika i zroźnicowanie składu mieszanki w cylindrach.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, zasilanie gazem propan-butan, kąt początku wtrysku, modelowanie przepływów ściśliwych.

1. Wprowadzenie

Właściwości, które zadecydowały o dominacji paliw ciekłych w motoryzacji to ich duża gęstość energetyczna oraz niskie koszty przetwarzania i przechowywania. Z czasem jednak udział paliw gazowych w ogólnym rynku paliw samochodowych zwiększył się znacząco. W Polsce w 2010 roku odnotowano ponad 2 mln pojazdów zasilanych paliwem LPG. Poza obniżeniem kosztów eksploatacji wynikających z zastosowania tego paliwa występuję jeszcze jeden bardzo ważny czynnik. Mianowicie, że względu na zmniejszenie udziału masowego węgla w cząsteczce na rzecz masy wodoru, następuje obniżenie emisji CO₂ na poziomie ok. 10%, w porównaniu z benzyną [1]. Jednak, aby zapewnić poprawną pracę silnika zasilanego paliwem LPG należy odpowiednio przeprowadzić proces montażu oraz kalibracji instalacji. Aktualnie, najczęściej montowane są instalacje wtrysku sekwencyjnego, w których z uwagi na niską gęstość energetyczną paliwa i prostotę zabudowy, wtrysk

LPG odbywa się do kolektora dolotowego. Często w praktyce warsztatowej możemy zauważyć, że oddalenie dyszy wtryskowej gazu od osi zaworu dolotowego znacząco wpływa na pracę silnika. Potwierdzają to zawarte w pracy [10] wyniki pomiarów stężenia składników toksycznych spalin. Znaczący wpływ na pracę silnika zasilanego gazem LPG ma również parametr czasowy w postaci kąta początku wtrysku [8]. Autor wykazał, że zmiana tego czynnika wpływa na osiągi silnika oraz toksyczność spalin.

Z dostępnej literatury wynika, że zastosowanie paliwa gazowego istotnie zmienia proces napełniania silnika o zapłonie iskrowym w porównaniu z zasilaniem benzyną [14], [15]. Skutki w postaci zmian sprawności wolumetrycznej η_v , wynikających z różnych wartości kąta początku wtrysku, przedstawiono w pracy [12]. Autorzy wykazali, że cylinder napełniany jest zdecydowanie najlepiej dla kąta α_w równym 0° (początek suwu dolotu). Badania zostały przeprowadzone dla jednej prędkości obrotowej oraz dwóch wartości kąta położenia

przepustnicy. We wszystkich przypadkach uzyskano zbliżone zależności. Dla granicznych wartości kąta α_w uzyskano najmniejsze wartości współczynnika η_v .

Ta sama grupa badaczy prowadziła również prace nad wpływem stanu skupienia paliwa na proces napełniania silnika zasilanego wtryskiem paliwa LPG [13]. Nie stwierdzono wpływu tego czynnika na sprawność wolumetryczną silnika η_v . Następnie otrzymane wyniki porównano z wynikami uzyskanymi dla zasilania silnika za pomocą tzw. instalacji drugiej generacji. Wykazano, że oddalenie elementu dozującego gaz od osi zaworu dolotowego powoduje pogorszenie pracy silnika.

Technika wtrysku gazu propan-butan została szeroko opisana w pracach [9], [11]. Przeprowadzono badania dla zasilania silnika wtryskiem symultanicznym i sekwencyjnym oraz badania wpływu kąta początku wtrysku na pracę silnika o zapłonie iskrowym. Wykazano, że zmiana techniki wtrysku (z symultanicznego na sekwencyjny) nie wywołuje znaczących zmian momentu obrotowego w badanych stanach pracy silnika. Stwierdzono natomiast, że w pewnym zakresie kątów początku wtrysku gazu następuje pogorszenie pracy silnika wskutek zaistnienia zjawiska wypadania zapłonów. Szczególnie duże pogorszenie uzyskano podczas badań silnika zasilanego mieszkanką ubogą ($\lambda=1,2$). Po przeprowadzeniu analizy stężenia składników toksycznych spalin zauważono, że najkorzystniejsze rozlokowanie paliwa występuje dla wczesnych kątów wtrysków, co skutkuje osiągnięciem minimum stężenia CO, zwiększeniem stężenia NO_x i zwiększeniem średniego ciśnienia indykowanego. Powyższe efekty są skutkiem zwiększenia stopnia zupełności spalania. Badania zostały przeprowadzone dla stałej odległości wtryskiwacza od osi zaworu dolotowego. W pracach [3], [13] zostały przedstawione wyniki badań składu spalin uzyskane podczas zasilania silnika paliwem LPG. W obydwu przypadkach uzyskano ponad 20% zmniejszenie emisji węglowodorów oraz dwutlenku węgla w porównaniu z wynikami otrzymanymi podczas zasilania silnika benzyną.

Wyniki badań potwierdzają, że napełnianie silnika mieszkanką powietrza i propanu-butanu jest uwarunkowane od czynników geometrycznych oraz czasowych. Odnośnie geometrii układu zasilania gazem LPG badano wpływ takich czynników, jak: średnica dyszy wtryskowej, średnica i długość przewodu wtryskowego. Również organizacja czasowa procesu wtrysku znacząco wpływa na proces napełniania silnika. Przekłada się to bezpośrednio na spalanie oraz skład spalin. W literaturze występuje niedostatek informacji dotyczących oddziaływania odległości dyszy wtryskowej od osi zaworu dolotowego na proces tworzenia mieszanki w silniku o zapłonie iskrowym, zasilanym wtryskiem propanu-butanu. Zwiększenie odległości może poprawić proces mieszania paliwa z powietrzem,

ale jednocześnie może powodować rozrzut składu mieszanki pomiędzy cylindrami w silniku wyposażonym w asymetryczny kolektor dolotowy.

W niniejszej pracy autor podjął próbę wyjaśnienia przyczyn powodujących pogorszenie pracy silnika na skutek zwiększenia odległości gazowej dyszy wtryskowej od osi zaworu dolotowego. Analizie poddano również wpływ czasowego przebiegu wtrysku gazu na pracę silnika.

2. Metodyka i obiekt badań

Przyjęta metodyka badań zakładała stabilizację prędkości obrotowej silnika. Mając na względzie możliwości posiadanego stanowiska badawczego, zdecydowano się na realizację badań dla prędkości obrotowej silnika równej 1500 obr/min. Z doniesień literaturowych wynika, że zakres małych prędkości obrotowych silnika stanowi ok. 30% czasu pracy silnika [2]. Przedstawione w rozprawie doktorskiej [7] wyniki wskazują, że łączny czas trwania stanów ustalonych stanowił ok. 2/3 ogólnego czasu wszystkich stanów pracy silnika. Wybór wartości ciśnienia panującego w kolektorze dolotowym podczas badań wynika z analizy zjawisk przepływowych zachodzących w silniku.

Badania przeprowadzono w ustalonych warunkach pracy wyrażonych przez:

- prędkość obrotową 1500 obr/min,
- ciśnienie w kolektorze dolotowym 40 kPa,
- kąt wyprzedzenia zapłonu 20°OWK,
- temperaturę cieczy chłodzącej 80°C,
- temperaturę oleju smarującego 80°C,
- wartość współczynnika składu mieszanki $\lambda=1,1$.

W każdym stanie pracy określonym przez L_w oraz skład mieszanki λ wykonano charakterystyki regulatorowe kąta początku wtrysku. Analizie poddano wyniki pomiarów stężenia składników toksycznych spalin (CO, HC, NO_x).

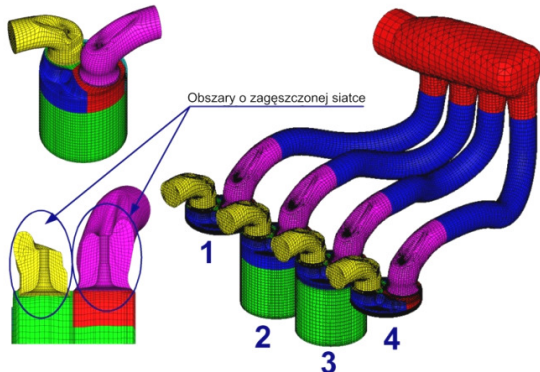
Drugim zadaniem badawczym było wykonanie symulacji procesu wtrysku i napełniania cylindrów mieszanką paliwowo-powietrzną. Zastosowano technikę określaną jako numeryczną mechanikę płynów CFD (ang. Computational Fluid Dynamics). Wybór metody badawczej został podyktowany analizą literatury. Zastosowanie numerycznej mechaniki płynów doskonale sprawdza się w badaniach procesu napełniania. Dowodzą o tym między innymi publikacje [4], [5] dotyczące problemów związanych z poprawą procesu roboczego silnika spalinowego. Użyto oprogramowania Star CD v 3.24 wraz z modułem es-ice przeznaczonym do symulacji tłokowych silników spalinowych. Model geometryczny składał się z czterech cylindrów wraz z głowicami i kolektorem dolotowym. Wymiary modelu odpowiadały rzeczywistemu silnikowi, na którym wykonano badania stanowiskowe.

Wykonano obliczenia w warunkach odpowiadających warunkom pracy silnika podczas badań

stanowiskowych. Przeprowadzono badania wpływu odległości L_w dyszy wtryskowej na rozkład mieszanki w poszczególnych cylindrach oraz rozrzut składu mieszanki pomiędzy cylindrami. Skupiając się wyłącznie na analizie procesu zasilania nie przeprowadzono symulacji procesu spalania.

Jako obiekt badań wybrano silnik o oznaczeniu Holden C20LE. Wybór podyktowany był względami praktycznymi oraz asymetrycznym układem kolektora dolotowego. Ze względu na większą dostępność zdecydowano się na zamontowanie instalacji gazu LPG. Badania przeprowadzono na hamowni silnikowej Politechniki Lubelskiej. W celu realizacji badań został odpowiednio przygotowany kolektor dolotowy silnika. Wykonano otwory w czterech odległościach od komory spalania: 115 mm, 170 mm, 230 mm, 310 mm, w których kolejno umieszczane były przewody doprowadzające gaz. W kolektorze zamontowano dysze wtryskowe o średnicy 4 mm pozwalające na przyłączenie przewodów gazowych. Szczegółowy opis stanowiska badawczego znajdują się w pracy [6].

Model silnika obejmuje kolektor dolotowy wraz z czterema cylindrami (rys. 1). Geometrię opracowano w programie *Catia V5* na podstawie dokumentacji technicznej oraz wykonanych pomiarów kolektora dolotowego i głowicy.

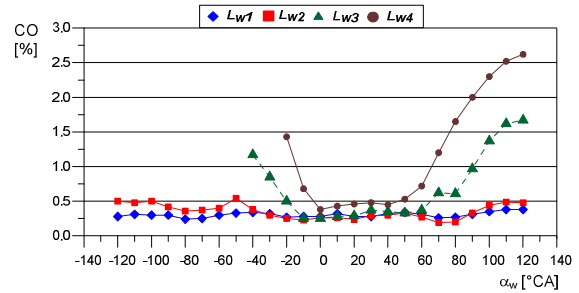


Rys. 1. Siatka obliczeniowa silnika Holden C20LE [6]

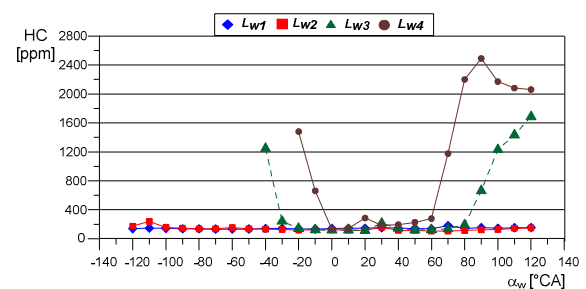
Fig. 1. Mesh of Holden C20LE engine [6]

3. Wyniki badań stanowiskowych

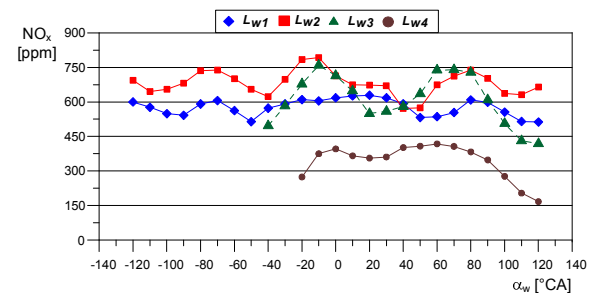
Na wykresach 2-4 przedstawiono zależności emisji składników toksycznych spalin od miejsca montażu dyszy wtryskowej oraz kąta początku wtrysku. Wyniki zestawiono dla silnika zasilanego mieszanką bogatą $\lambda=0,98$ oraz mieszanką ubogą $\lambda=1,1$. Wyniki badań przedstawiono w funkcji obrotu wału korbowego. Wartość 0 °OWK oznacza położenie tłoka w górnym martwym położeniu suwu dolotu. Kolejne warianty montażu dysz wtryskowych oznaczono $L_{w1,2,3,4}$.



Rys. 2. Zależność stężenia tlenku węgla w spalinach od kąta początku wtrysku α_w i odległości dyszy wtryskowej od komory spalania L_w
Fig. 2. Dependence of carbon monoxide in the exhaust gases on the early injection angle α_w and the distance between the injection nozzle and combustion chamber L_w



Rys. 3. Zależność stężenia węglowodorów w spalinach od kąta początku wtrysku α_w i odległości dyszy wtryskowej od komory spalania L_w
Fig. 3. Dependence of hydrocarbon in the exhaust gases on the early injection angle α_w and the distance between the injection nozzle and combustion chamber L_w



Rys. 4. Zależność stężenia tlenków azotu w spalinach od kąta początku wtrysku α_w i odległości dyszy wtryskowej od komory spalania L_w
Fig. 4. Dependence of nitrogen oxides in the exhaust gases on the early injection angle α_w and the distance between the injection nozzle and combustion chamber L_w

Przeprowadzono analizę porównawczą otrzymanych wyników badań stanowiskowych. Jako punkt odniesienia przyjęto wyniki otrzymane podczas pracy silnika przy najmniejszej odległości dyszy wtryskowej od komory spalania L_{w1} , zarówno przy zasilaniu silnika mieszanką bogatą jak i ubogą.

Jako wskaźnik określający ilościowy wzrost stężenia składników toksycznych spalin przyjęto iloraz wartości stężenia mierzonego składnika spalin (CO , HC , NO_x) otrzymanego w danym punkcie pracy silnika określonym przez L_w oraz α_w do wartości otrzymanej dla pierwszego wariantu montażu dyszy wtryskowej L_{w1} .

$$\phi = \frac{x_{Lwx}}{x_{Lw1}} \quad (1)$$

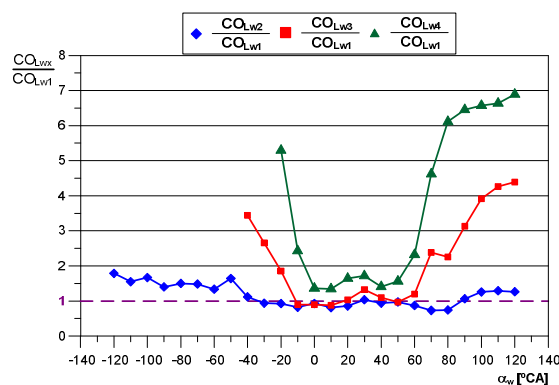
gdzie:

ϕ – wartość względną stężenia,

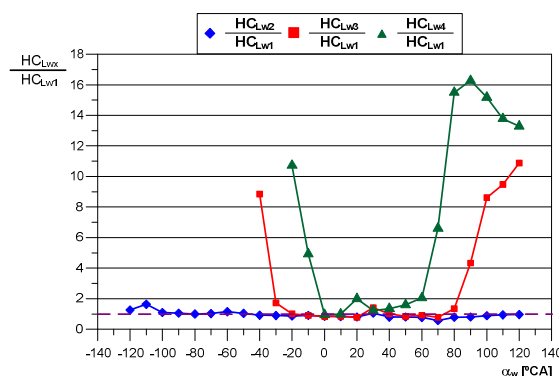
x_{Lwx} – wartość stężenia składników toksycznych spalin otrzymana przy $L_{w2,3,4}$,

x_{Lw1} – wartość stężenia składników toksycznych spalin przy L_{w1} .

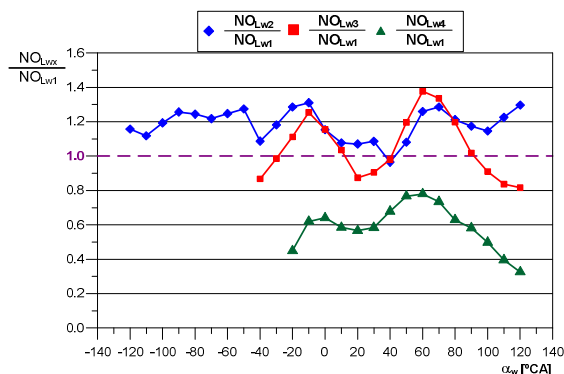
Rysunki 5-7 przedstawiają wpływ kąta początku wtrysku na analizowane wartości względne.



Rys. 5. Zależność względnego stężenia w spalinach tlenku węgla od kąta początku wtrysku α_w dla kolejnych wariantów montażu dysz wtryskowych.



Rys. 6. Zależność względnego stężenia w spalinach węglowodorów od kąta początku wtrysku α_w dla kolejnych wariantów montażu dysz wtryskowych.



Rys. 7. Zależność względnego stężenia w spalinach tlenków azotu od kąta początku wtrysku α_w dla kolejnych wariantów montażu dysz wtryskowych

Odnosząc się do rysunku 5, który przedstawia względną emisję tlenku węgla, zmiana odległości wpływa intensywnie w zakresie wczesnych oraz późnych kątów początku wtrysku. Dla kąta $\alpha_w = 120^\circ$ oraz odległości $L_{w4} = 310$ mm uzyskano siedmiokrotny wzrost stężenia CO . W przedziale kątów środkowych odległość dyszy wtryskowej wywiera również większy wpływ na skład spalin niż kąt początku wtrysku α_w . Uzyskano zmianę na poziomie 80% (emisja HC , L_{w1} , $\alpha_w = 20^\circ$), która była większa niż podczas zasilania silnika mieszanką bogatą.

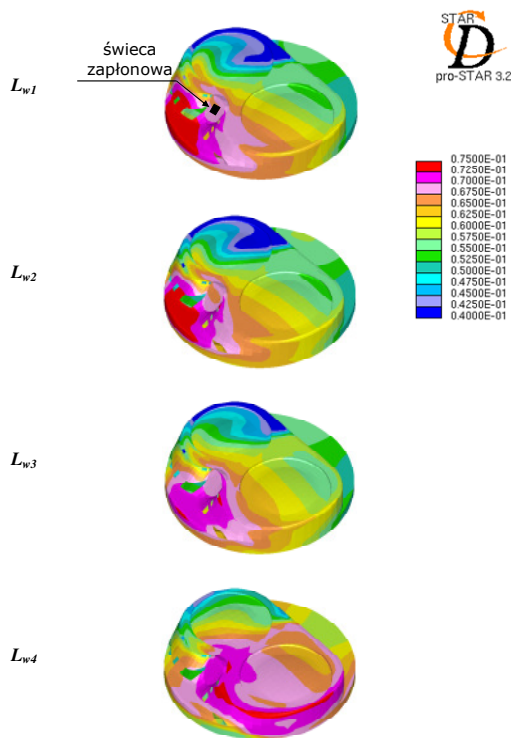
Przedstawiona na rysunku 6 względna emisja węglowodorów wykazuje podobne zmiany na skutek oddalenia dyszy wtryskowej od osi zaworu dolotowego, jak w przypadku względnej emisji tlenku węgla. Maksymalne wartości uzyskano dla granicznych kątów α_w oraz odległości L_{w4} . Dla kąta $\alpha_w = 120^\circ$ wystąpił osiemnastokrotny wzrost stężenia niespalonych węglowodorów, natomiast dla kąta $\alpha_w = -40^\circ$ wzrost był jedenastokrotny.

Odnosnie względnej emisji tlenków azotu największy wpływ oddalenia dysz wtryskowych od osi zaworu dolotowego stwierdzono podczas pracy silnika przy odległości L_{w4} , gdzie w całym zakresie kąta α_w nastąpiło obniżenie wartości stężenia.

Na przedstawionych rysunkach 5-7 można zauważyć, że w zakresie zmian środkowych kątów początku wtrysku występują najmniejsze zmiany względnych wartości emisji mierzonych składników spalin. Porównując uzyskane wyniki z wynikami przedstawionymi w pracy [10], czułość na zmiany odległości od zaworu dolotowego jest większa dla zasilania silnika mieszanką ubogą. Natomiast zmiana odległości dyszy wtryskowej od osi zaworu dolotowego prowadzi do większych zmian składu spalin niż zmiana kąta początku wtrysku.

4. Wyniki badań symulacyjnych

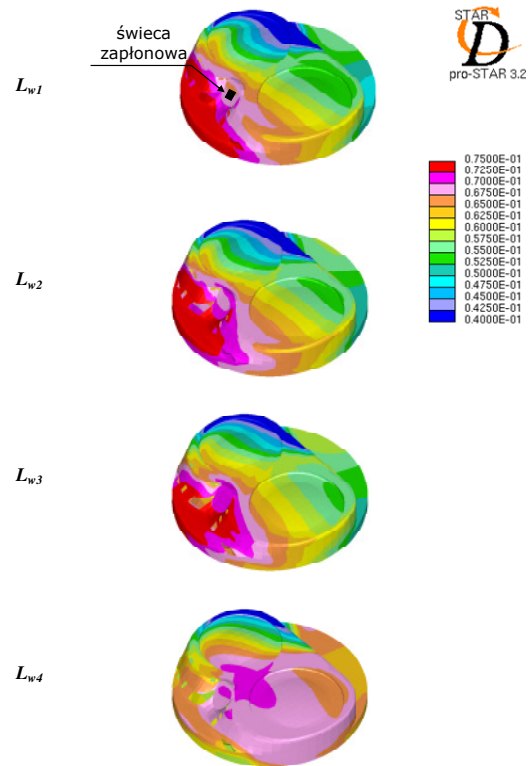
Na rys. 8-11 przedstawiono depozycję paliwa w komorach spalania dla kolejnych wariantów montażu dysz wtryskowych L_w . Wyniki przedstawiają koncentrację paliwa w chwili zapłonu, tj. 20°OWK przed górnym martwym położeniem tłoka w suwie sprężania. Następnie przedstawiono zmianę masy paliwa, zmianę średniej koncentracji paliwa oraz zmianę koncentracji paliwa przy świecy zapłonowej w komorze spalania w funkcji kąta obrotu wału korbowego.



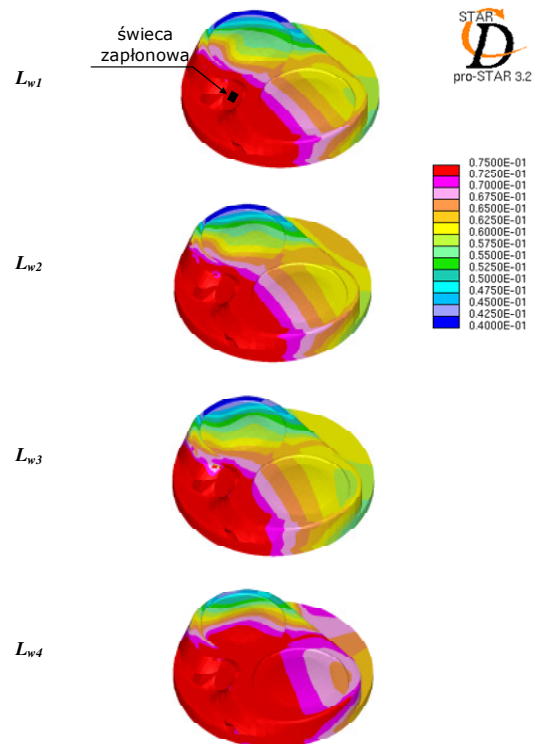
Rys. 8. Rozkład paliwa w **pierwszym cylindrze** dla kolejnych wariantów montażu dysz wtryskowych
Fig. 8. The fuel distribution in the **1st cylinder** for the variants of nozzle installation

Można to zaobserwować analizując przedstawione na rysunkach 9-11 rozmieszczenie paliwa w cylindrach. W całej objętości komory spalania następuje ujednorodnienie mieszaniny paliwowo-powietrznej na skutek oddalenia dyszy wtryskowej od osi zaworu dolotowego.

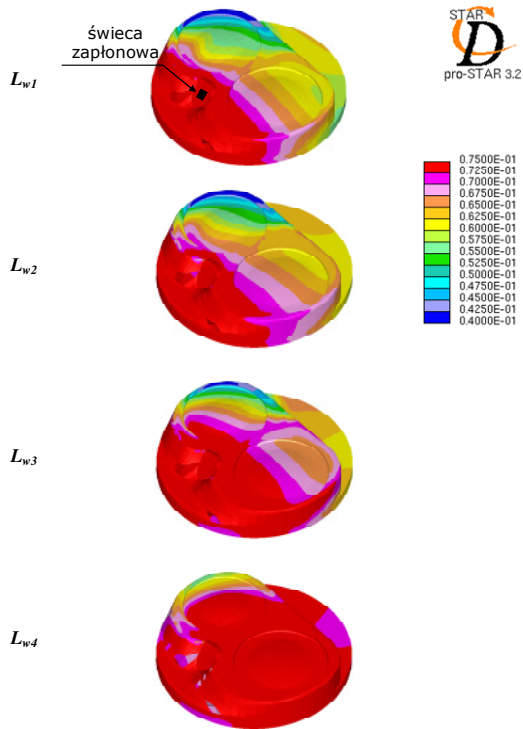
Podsumowując, można stwierdzić, że oddalenie dyszy wtryskowej od osi symetrii zaworu dolotowego powoduje poprawę homogenizacji mieszaniny paliwowo-powietrznej w poszczególnych cylindrach silnika.



Rys. 9. Rozkład paliwa w **drugim cylindrze** dla kolejnych wariantów montażu dysz wtryskowych
Fig. 9. The fuel distribution in the **2nd cylinder** the variants of nozzle installation

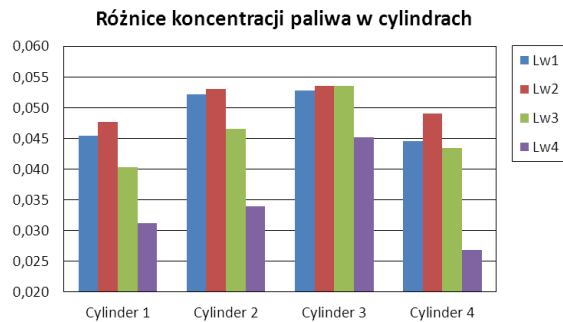


Rys. 10. Rozkład paliwa w **trzecim cylindrze** dla kolejnych wariantów montażu dysz wtryskowych
Fig. 10. The fuel distribution in the **3rd cylinder** for the variants of nozzle installation



Rys. 11. Rozkład paliwa w czwartym cylindrze dla kolejnych wariantów montażu dysz wtryskowych
 Fig. 6.25 The fuel distribution in the 4th cylinder for the variants of nozzle installation

4.1. Analiza homogenizacji mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrach



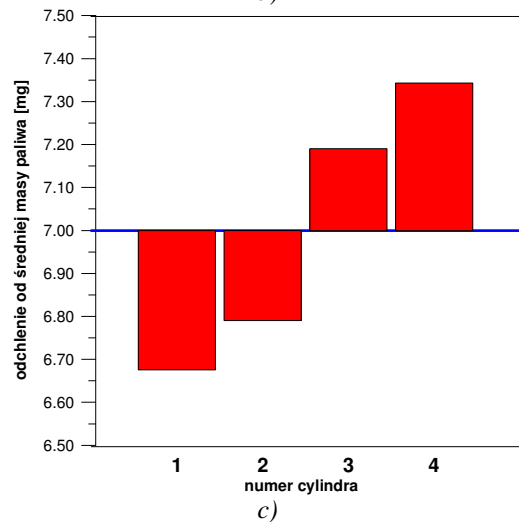
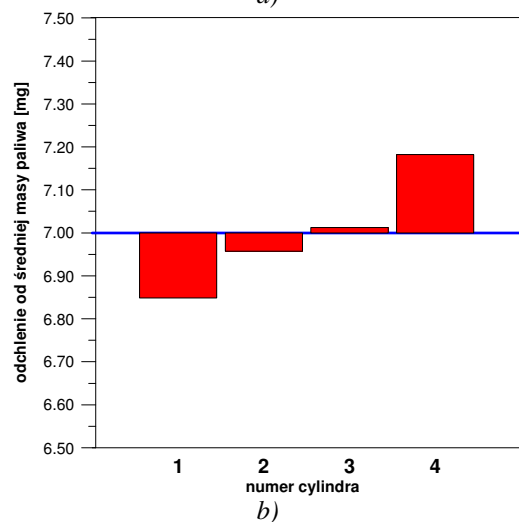
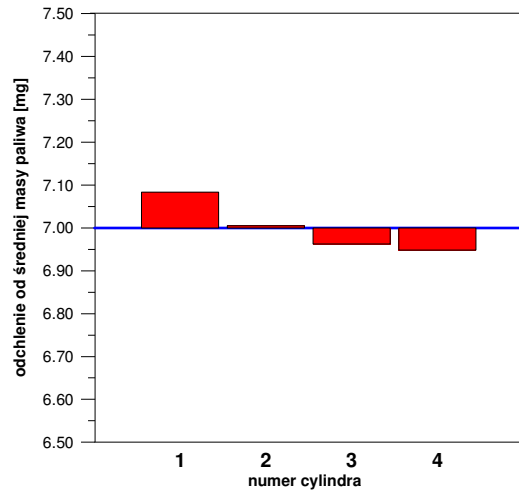
Rys. 12. Różnice pomiędzy maksymalną a minimalną lokalną koncentracją paliwa w chwili zapłonu w poszczególnych cylindrach.

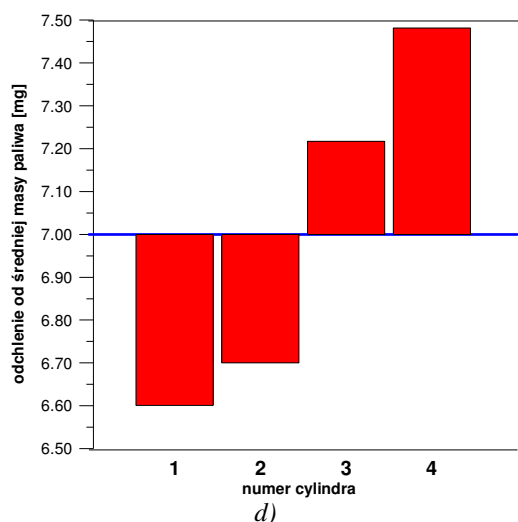
Rys. 12. Differences between the maximum and minimum local fuel concentration in each cylinder

Na rys. 12 przedstawiono zróżnicowanie rozkładu paliwa w komorach spalania (różnica pomiędzy lokalną koncentracją maksymalną a minimalną). W każdym cylindrze badanego silnika można stwierdzić, że oddalenie dyszy wtryskowej od osi zaworu dolotowego przyczynia się do zwiększenia stopnia homogenizacji mieszaniny paliwowo-

powietrznej. Najmniejszą różnicę (wynoszącą 0,02683) uzyskano w cylindrze czwartym oraz odległości L_{w4} , natomiast największą (równą 0,05359) w cylindrze trzecim oraz odległości L_{w2} .

4.2. Analiza nierównomierności rozdziału paliwa na poszczególne cylindry silnika





Rys. 13. Dyspersja masy paliwa pomiędzy poszczególnymi cylindrami silnika dla kolejnych badanych odległości: a) L_{w1} , b) L_{w2} , c) L_{w3} , d) L_{w4} .

Rys. 13. The dispersion of fuel between the cylinders for the subsequent distances: a) L_{w1} , b) L_{w2} , c) L_{w3} , d) L_{w4} .

Na rys. 13 oraz w tabeli 1 przedstawiono zróżnicowanie masy paliwa w cylindrach według odległości dyszy wtryskowej od osi zaworu dolotowego L_w dla kolejnych cylindrów. W odniesieniu do odległości oznaczonej jako L_{w1} nierównomierność rozdziału paliwa pomiędzy cylindrami silnika jest najmniejsza. W tym przypadku do cylindra pierwszego jest dostarczona największa masa paliwa i wynosi 7,084 mg, a nierównomierność rozdziału (różnica pomiędzy maksymalną a minimalną masą paliwa w cylindrach) wynosi 0,135 mg. Na tej podstawie można stwierdzić, że już przy małej odległości L_w następuje pewna wymiana paliwa pomiędzy przewodami dolotowymi poszczególnych cylindrów podczas pracy silnika w warunkach małej prędkości obrotowej i małego obciążenia. Wraz ze zwiększaniem L_w następuje nasilenie tego zjawiska.

Największe zróżnicowanie masy paliwa występuje pomiędzy cylindrem pierwszym a cylindrem czwartym. Wartości różnic zostały zestawione w tabeli 1.

Tab. 1.
Nierównomierność rozdziału masy paliwa

| Odległość | Różnice w masie paliwa pomiędzy cylindrem I a IV |
|-----------|--|
| L_{w1} | 0,135 mg |
| L_{w2} | 0,334 mg |
| L_{w3} | 0,667 mg |
| L_{w4} | 0,880 mg |

Przyczyną tego zjawiska jest wymiana paliwa w kolektorze pomiędzy przewodami dolotowymi poszczególnych cylindrów. Do cylindra trzeciego oraz czwartego dostarczana jest większa masa paliwa, kosztem cylindra pierwszego drugiego.

5. Podsumowanie i wnioski

Otrzymane wyniki badań stanowiskowych oraz symulacyjnych rozszerzyły wiedzę dotyczącą wpływu czynników geometrycznych na proces tworzenia mieszanki w silniku o zapłonie iskrowym zasilanym wtryskiem gazu.

Zrealizowane badania wykazały, że zwiększenie odległości pomiędzy dyszą wtryskową gazu propan-butan a osią zaworu dolotowego w silniku wielocylindrowym wyposażonym w asymetryczny układ dolotowy:

- wpływa istotnie na pracę silnika; największy wpływ, powodujący wielokrotne zwiększenie stężenia niespalonych węglowodorów i tlenu węgla w spalinach, stwierdzono dla wczesnych i późnych kątów początku wtrysku,
- powoduje lepsze wymieszanie paliwa z powietrzem; różnica pomiędzy maksymalną a minimalną lokalną koncentracją paliwa w komorze spalania jest dwukrotnie niższa w L_{w4} niż w L_{w1} ,
- powoduje pogorszenie równomierności rozkładu paliwa pomiędzy cylindrami silnika; wykazano, że dla najdalej oddalonej dyszy wtryskowej od osi zaworu dolotowego, różnica masy paliwa pomiędzy cylindrem pierwszym a czwartym wynosi około 0,9 mg.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

CNG Compressed Natural Gas/sprężony gaz ziemny
 LPG Liquefied Petroleum Gas/gaz skroplony
 α_w Injection start angle/kąt początku wtrysku

L_w Distance of the injection nozzle from the inlet valve axis/odległość dyszy wtryskowej od osi zaworu dolotowego

Bibliography/Literatura

- [1] AEGPL Europe: Strategy to reduce CO₂ emissions from cars, AEGPL response to Commission's consultation, Reducing CO₂ from passenger cars and light-commercial vehicles, Final Report, Brussels, 2007.
- [2] Almkvist G., Denbratt I., Josefsson G., Magnusson I.: Measurement of fuel film thickness in the inlet port of an SI engine by laser induced fluorescence. SAE Technical Paper nr 952483, 1995.
- [3] Bass E., Bailey B., Jaeger S.: LPG Conversion and HC Emission Specification of Light-Duty Vehicle. SAE Technical Paper nr 932447, 1993.
- [4] Bedford F., Hu X., Schmidt U.: In-cylinder combustion modeling and validation using Fluent. 14th Annual International Multidimensional Engine Modeling User's Group Meeting, Detroit, 2004.
- [5] Deur J. M., Jonnawthuta S.: The Combination of Detailed Kinetics and CFD in Automotive Applications. Eleventh International Engine Combustion Multi-Dimensional Modeling Conference, Detroit, 2001.
- [6] Grabowski Ł., Wendeker M.: The Mixture Formation Process In The Gas Fuelled Engine. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2010.
- [7] Hawryluk B.: Stochastyczny model samochodowego silnika benzynowego w aspekcie stechiometrycznego składu mieszanki paliwowo-powietrznej. Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, 2001.
- [8] Jakliński P., Czarnigowski J., Wendeker M.: The Effect of Injection Start Angle of Vaporized LPG on SI Engine Operation Parameters, SAE 2007-01-2054, 2007.
- [9] Jakliński P., Czarnigowski J., Wendeker M.: The effect of injection start angle of vaporized LPG on SI engine operation parameters. SAE Technical Paper nr 2007-01-2054, 2007.
- [10] Jakliński P., Grabowski Ł., Wendeker M., Czarnigowski J., Szczyński P., Barański G., Sochaczewski R.: Analiza wpływu umieszczenia wtryskiwacza LPG na parametry pracy silnika o zapłonie iskrowym, Silniki Spalinowe 4/2007, str. 33-41.
- [11] Jaworski Z.: Numeryczna mechanika płynów w inżynierii chemicznej i procesowej. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2005.
- [12] Lee D., Cho S., Lee B., Ko S., Choi J.: Intake flow observation with gaseous LPG injection in a SI engine. ILASS-Asia 2005, Oct. 13-14, 2005, Seoul, Korea.
- [13] Lee D., Cho S., Lee B., S. Ko, Park J., Choi J.: Enhancement of volumetric efficiency in a gaseous LPG injection engine. The 13th International Pacific Conference on Automotive Engineering, Gyeongju, South Korea, 2005.
- [14] Lee J., Farrell P. V.: Intake Valve Flow Measurements of an IC Engine Using Particle Image Velocimetry. SAE Paper No. 930480, 1993.
- [15] Smith W. J., Timoney D. J., Lynch D. P.: Emissions and Efficiency Comparison of Gasoline and LPG Fuels in a 1.4 Litre Passenger Car Engine. SAE Technical Paper nr 972970, 1997.

Mr Łukasz Grabowski, doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.

Dr inż. Łukasz Grabowski – pracownik naukowy na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej

