Tomasz Skrzek, Grzegorz Jarzyński

Badania wpływu parametrów wtrysku oleju napędowego na emisję cząstek stałych w dwupaliwowym doładowanym silniku zasilanym gazem naturalnym

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.389
Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

W artykule zaprezentowane zostały wyniki badań dwupaliwowego, doładowanego silnika o zapłonie samoczynnym, zasilanego gazem naturalnym. Celem głównym prowadzonych badań było określenie wpływu parametrów wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego tj.: wielkość oraz kąt początku wtrysku na emisję cząstek stałych. Badania wykazały, że przy stosowaniu podziału dawki oleju napędowego na dawkę pilotującą i główną, pomimo znaczącego (70%) udziału energetycznego paliwa gazowego w spalanej mieszaninie emisja cząstek stałych jest porównywalna a nawet większa od tej uzyskanej na paliwie standardowym. Wcześniejsze badania silnika dwupaliwowego wykazały, że istnieje wyraźna potrzeba stosowania podziału dawki oleju napędowego na dawkę pilotującą i dawkę główną. Podział ten w istotny sposób wpływa na przebieg wywiązywania się ciepła a zarazem stanowi skuteczną metodę redukcji maksymalnej szybkości narastania ciśnienia spalania, co pozwala na zwiększania udziału paliwa dodatkowego. Z punku widzenia emisji cząstek stałych podział taki nie jest korzystny. Uzyskane wyniki badań wskazują, że wielkości dawek pilotującej i głównej oraz ich kąt początku wtrysku w istotny sposób wpływają na warunki tworzenia się cząstek stałych.

Słowa kluczowe: silnik dwupaliwowy, gaz naturalny, spalanie.

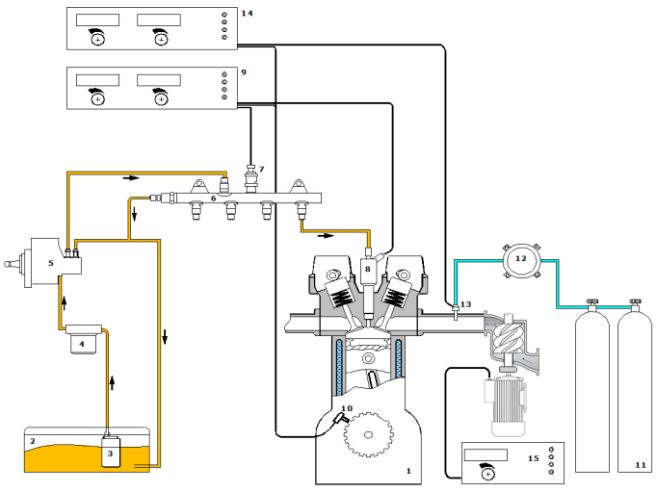
Wstęp

Jak pokazują liczne publikacje zarówno krajowe jak i zagraniczne idea zasilania dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym jest atrakcyjna i ciągle udoskonalana [1-11]. W zasilaniu tego typu upatruje się poprawy składu emisji spalin oraz ograniczenia kosztów eksploatacji tak zasilanych silników. Niniejszy artykuł poświęcony jest tym zagadnieniom. Atrakcyjność tego typu zasilania wynika głównie z możliwości zasilania go paliwami tańszymi dostępnymi na rynku. Mogą to być zarówno paliwa odnawialne jak i pochodzące z rafinacji ropy naftowej. Ze względu na wysoką odporność na spalanie stukowe, wysoką temperaturę samozapłonu, oraz czyste spalanie gaz naturalny postrzegany jest, jako jedno z lepszych źródeł energii zasilającej silnik o zapłonie samoczynnym.

Niewątpliwie pożądaną cechą zasilania dwupaliwowego będzie zastąpienie paliwa standardowego (oleju napędowego) paliwem tańszym w możliwie jak największym stopniu, a ponadto użycie możliwie najprostszych a zarazem najtańszych metod dostarczania paliwa dodatkowego bez ingerencji w konstrukcję silnika [3, 5]. Spełnienie warunku maksymalizacji udziału paliwa dodatkowego nie jest łatwe. Istnieją bowiem ograniczenia wynikające głównie z istotnych zmian w przebiegu procesu spalania. Zmiany te są efektem dostarczania paliwa dodatkowego w raz z powietrzem w cyklu napełniania cylindra. Sprężany czynnik jest zatem mieszaniną paliwa i powietrza od składu której silnie zależą podstawowe parametry procesu spalania a tym samym skład spalin tak zasilanego silnika. Sposób dostarczania paliwa realizowany jest najczęściej za pomocą miksera lub wtryskiwacza jak ma to miejsce w stosowanych od lat instalacjach zasilających silniki o zapłonie iskrowym. Należy jednak zaznaczyć, że o ile metody te sprawdzają się w przypadku wolnossących silników o zapłonie iskrowym to w przypadku doładowanych silników diesla, w których występuje przykrycie zaworowe metody te w istotny sposób przyczyniają się do ucieczki części ładunku podnosząc tym samym emisję węglowodorów jednocześnie pogarszając sprawność tak zasilanego silnika. Tym zagadnieniom poświęcone zostały badania [11]. Jak pokazały te oraz wcześniejsze badania [5] możliwe jest takie podawanie paliwa dodatkowego, aby zjawisko utraty części ładunku możliwie skutecznie ograniczyć. Na potrzeby badań zamieszczonych w niniejszym artykule, gaz naturalny podawany był przy użyciu wtryskiwacza umieszczonego w pobliżu zaworu dolotowego, którego kąt początku wtrysku zsynchronizowany został z fazą napełniania cylindra, co w znacznej mierze przyczyniło się do ograniczenia utraty ładunku, a tym samym wpłynęło na poprawę sprawności ogólnej silnika oraz na emisję węglowodorów. Do osiągniecia celu badawczego wykorzystano możliwości współczesnego układu zasilania typu common rail. Jak wykazały te oraz wcześniejsze badania [6] sposób uwalniania energii zawartej w paliwie głównym bardzo istotnie zależy od strategii doboru parametrów wtrysku oleju napędowego [4, 7, 8, 10]. Istotne jest czy dawka inicjująca zapłon wtryskiwana jest jednorazowo czy jest ona podzielona na dawkę pilotującą i główną. Istotna jest również wielkość dawki lub dawek inicjujących zapłon, oraz kąt początku ich wtrysku. Wprowadzając zmiany ww. parametrów wtrysku oleju napędowego możliwe jest bardzo elastyczne kształtowanie procesu spalania, co pozwala na uzyskanie podobnych parametrów procesu spalania do tych, jakie towarzyszą pracy silnika zasilanego standardowo. Rejestracja składu spalin oraz ciśnienia w cylindrze pozwalały na analizę wpływu zmian parametrów wtrysku oleju napędowego na proces spalania w tak zasilanym silniku.

1. Charakterystyka obiektu badań i stosowanej aparatury pomiarowej

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym firmy AVL, wyposażonym w jednocylindrowy silnik AVL 5402 o zapłonie samoczynnym przystosowany do zasilania dwupaliwowego. Zarówno miejsce osadzania wtryskiwacza, jak i parametry wtrysku gazu dobrane zostały w taki sposób, aby maksymalnie ograniczyć możliwość ucieczki ładunku w chwili przekrycia zaworowego. Parametry te zostały przyjęte i ustalone na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań [6]. Ogólny schemat silnika zasilanego dwupaliwowo został przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Ogólny schemat dwupaliwowego systemu zasilania silnika o zapłonie samoczynnym: 1) silnik dwupaliwowy, 2) zbiornik oleju napędowego, 3) elektryczna pompa paliwa, 4) filtr paliwa, 5) wysokociśnieniowa pompa paliwa, 6) zasobnik, 7) czujnik ciśnienia paliwa, 8) wtryskiwacz oleju napędowego, 9) sterownik układu zasilania common rail, 10) czujnik położenia i prędkości wału korbowego, 11) zbiorniki gazu, 12) reduktor gazu, 13) wtryskiwacz gazu, 14) sterownik układu zasilania gazem, 15) system sterowania doładowaniem silnika.

Ponadto w skład w skład stanowiska badawczego wchodzą:

- hamulec elektrowirowy AVL,
- system do indykowania (IndiCom),
- system doładowania (AVL boost - sprężarka zasilana elektrycznie),
- system do analizy spalin (SESAM I 60),
- system pomiaru masowego stężenia cząstek stałych (Micro Soot Sensor),
- system pomiaru masowego natężenia przepływu oleju napędowego zużywanego przez silnik z kondycjonowaniem temperaturowym,
- system pomiaru masowego natężenia przepływu gazu naturalnego zużywanego przez silnik (mini CORI-FLOW).

Ogólny widok stanowiska badawczego przedstawia fotografia rys. 2.

Rys. 2. Hamownia silnikowa firmy AVL, widok stanowiska badawczego

Rys. 3. Widok sterowni hamowni silnikowej

2.Program badań – założenia i zakres

Badania zdecydowano przeprowadzić dla wybranej jednej prędkości obrotowej silnika n=1800obr /min.

- wytypowano trzy wartości dawki pilotującej oleju napędowego: QI (2; 2.5; 3 mg),
- wybrano szeroki zakres zmienności kąta wyprzedzenia wtrysku dawki pilotującej oleju napędowego αI (14°÷ 30° OWK przed GMP),
- wytypowano trzy różne wartości kąta początku wtrysku dawki głównej oleju napędowego αII (3°, 4°, 5° OWK przed GMP),
- przyjęto stałą wartość ciśnienia doładowania p (400 mbar)
- przyjęto założenie stałego udziału energetycznego gazu naturalnego na poziomie 70% energii dostarczanej do silnika
- przyjęto stałą wartość dawki energetycznej oleju napędowego na poziomie 30% energii dostarczanej do silnika (co oznacza że zmiana wielkości dawki pilotującej nie wpływała na zmianę energii dostarczanej z olejem napędowym)
- przyjęto stały współczynnik nadmiaru powietrza dla wszystkich punktów pomiarowych λ=1,3

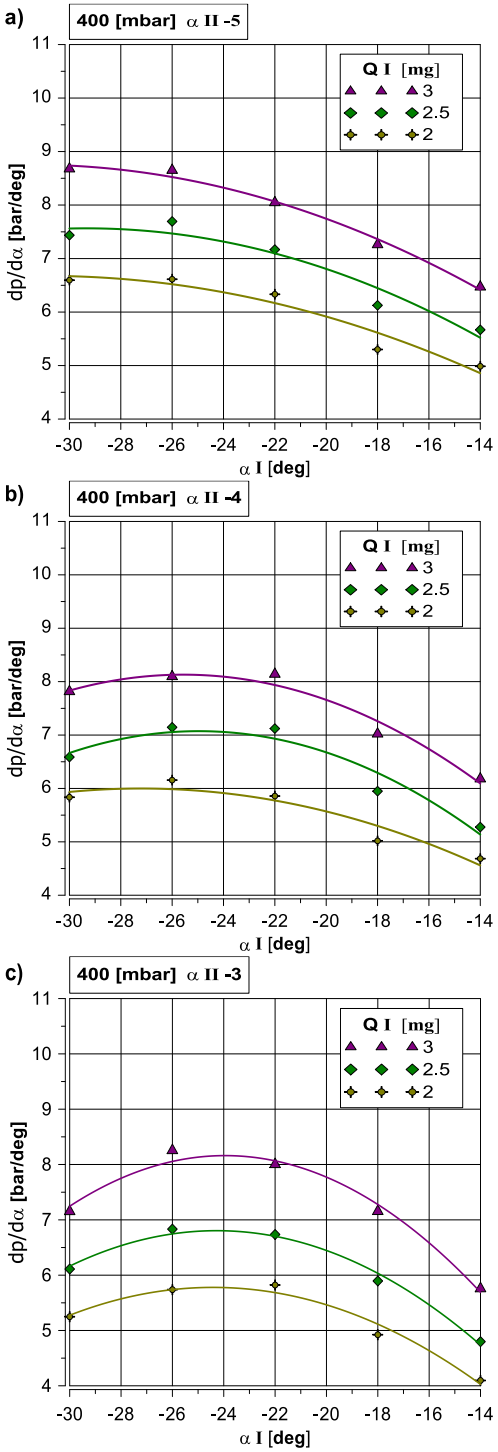
W czasie realizacji każdego punktu pomiarowego rejestrowano stężania masowe cząstek stałych PM.

3.Wyniki badań

3.1 Parametry charakteryzujące proces spalania

Jak wspomniano we wstępie jednym z parametrów charakteryzujących proces spalania, który wyraźnie zależy od sposobu uwalniania energii jest maksymalna szybkość narastania ciśnienia. Parametr ten determinuje strategię doboru parametrów wtrysku oleju napędowego dla silnika zasilanego dwupaliwowo, dlatego też jako pierwsze omówione zostaną wyniki dotyczące maksymalnej szybkości narastania ciśnienia spalania. Przyjmuje się że wartość graniczna tego parametru nie powinna przekraczać 1 MPa/deg. Wzrost maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wiąże się ze wzrostem obciążeń zarówno cieplnych jak i mechanicznych silnika, co z punktu widzenia trwałości silnika nie jest korzystne. Udział paliwa gazowego przy zachowanych parametrach wtrysku oleju napędowego właściwych dla zasilania standardowego w sposób znaczący przyczynia się do wzrostu maksymalnej szybkości narastania ciśnienia znacznie przekraczającej wartość 1 MPa/deg [6]. Parametr ten dla zasilania standardowego w podobnych warunkach pracy silnika (obciążenie, prędkość obrotowa wału korbowego) nie przekracza 0.6 MPa/deg. Należy tu zauważyć, że wartość tego parametru bardzo wyraźnie zależy od: stężenia gazu w sprężanej mieszaninie, rodzaju paliwa gazowego (właściwości fizykochemicznych), wielkości oraz kąta początku wtrysku dawki pilotującej [1,2]. Również kąt początku wtrysku dawki głównej odgrywa tu ważną rolę i traktowany jest, jako skuteczne narzędzie w redukowaniu maksymalnej szybkości narastania ciśnienia spalania. Opóźnia-

nie jednak kąt początku wtrysku dawki głównej w celu redukcji maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wiąże się z opóźnianiem procesu spalania, co prowadzi do zwiększenia strat ciepła a tym samym obniżenia sprawności cieplnej a zarazem ogólnej silnika. Zatem z punktu widzenia uzyskania wysokiej sprawności silnika, zachowania trwałości, ale również emisji szkodliwych produktów spalania, bardzo istotny jest staranny dobór parametrów wtrysku oleju napędowego w silniku zasilanym dwupaliwowo. Analizując uzyskane wyniki badań wpływu parametrów wtrysku oleju napędowego na maksymalną szybkość narastania ciśnienia można wskazać, iż wraz ze wzrostem wielkości dawki pilotującej wartość tego parametru rośnie rys.4. Zmiana kąta początku wtrysku dawki pilotującej również powoduje wyraźnie zmiany tego parametru. Najwyższe wartości uzyskano dla najwcześniejszego kąta początku wtrysku zarówno dawki pilotującej (αI -30°) jak i dawki głównej (αII -5°). Mimo tak wczesnego kąta początku wtrysku dawki pilotującej proces spalania jest inicjowany. Rozpoczęty zbyt wcześnie proces spalania, podtrzymywany przez wtrysk dawki głównej przyczynia się do wzrostu maksymalnej szybkości narastania ciśnienia. Zarówno te jak i wcześniejsze badania silnika zasilanego dwupaliwowo wykazały, że wtrysk dawki pilotujące rozpoczęty w chwili, gdy temperatura sprężanego czynnika jest niższa od temperatury samozapłonu oleju napędowego powoduje wyraźne podwyższenie wartości maksymalnej szybkości narastania ciśnienia. Zależność ta związana jest z zanikiem wpływu dawki pilotującej na zmianę parametrów termodynamicznych sprężanej mieszaniny. Z chwilą, gdy dawka pilotująca podejmuje proces spalania uwalniana jest część energii zawartej w sprężanej mieszaninie oraz w samej dawce inicjującej. Wtrysk dawki głównej do przestrzeni objętej działaniem dawki pilotującej skraca czas samozapłonu głównej dawki oleju napędowego a tym samym przyczynia się do obniżenia maksymalnych wartości szybkości narastania ciśnienia. Wyraźną redukcję tego parametru obserwuje się wraz z opóźnianiem kąta początku wtrysku dawki pilotującej. Najniższe wartości tego parametru przypadają, gdy kąt początku wtrysku dawki pilotującej wynosi 14° przed GMP. Tak późny kąt początku wtrysku sprawia, że maksimum szybkości narastania ciśnienia przypada po GMP w suwie pracy, kiedy rosnąca objętość przestrzeni nad tłokiem sprzyja redukcji maksymalnej szybkości narastania ciśnienia. Z kolei opóźniając jedynie dawkę główną w odstępach jedno stopniowych, wartości maksymalnej szybkości narastania ciśnienia ulegają nieznacznym zmianom, natomiast bardziej wyraźne są zmiany położenia wartości maksymalnych tego parametru. Szybkość narastania ciśnienia spalania w istotny sposób zależy również od czasu, jaki upłynął pomiędzy wtryskiem dawki pilotującej i głównej. Efekt w postaci redukcji maksymalnej szybkości narastania ciśnienia możliwy jest wówczas, gdy wtrysk dawki głównej realizowany jest do przestrzeni komory spalania, w której miał miejsce proces spalania spowodowany dawką pilotującą. Daje to szansę na skrócenie opóźnienia samozapłonu głównej dawki oleju napędowego a tym samym mniej gwałtowny przebieg narastania ciśnienia spania. Skrócenie dystansu pomiędzy wtryskiwanymi dawkami poprzez opóźnianie wtrysku tylko dawki pilotującej skutkuje tym, że warunki termodynamiczne czynnika, do którego wtryskiwana jest główna dawka oleju napędowego są zbliżone do warunków w których realizowany jest pojedynczy wtrysk.

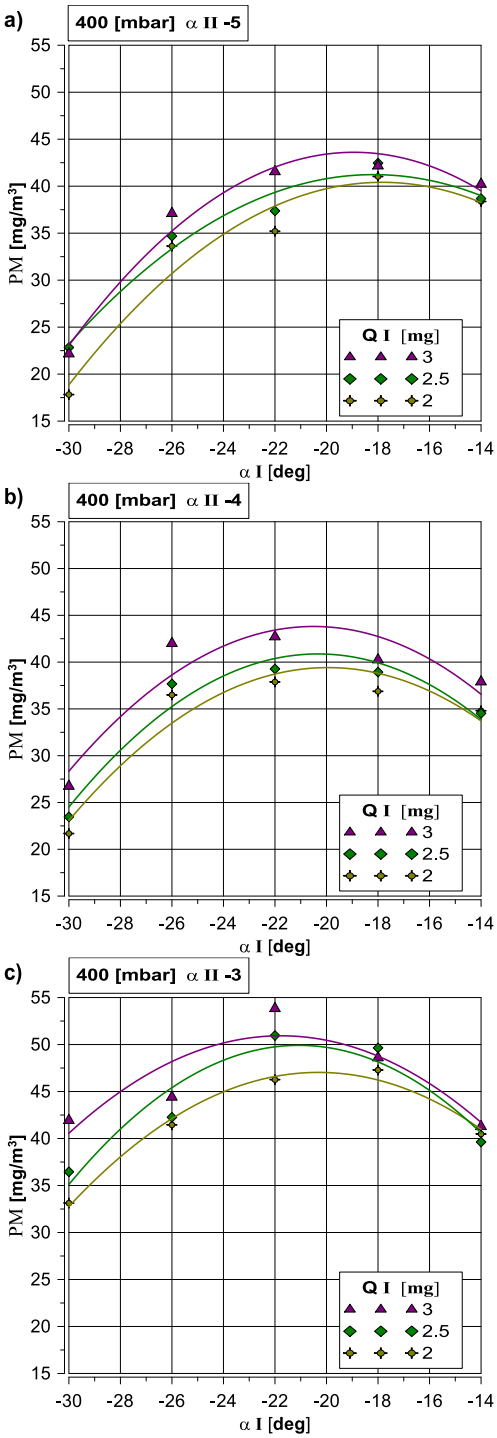


Rys. 4. Charakterystyki zmienności maksymalnej szybkości narastania ciśnienia dla trzech wielkości dawki pilotującej QI 2, 2.5, 3 mg, różnych wartości kąta początku wtrysku αI w przedziale od 30°÷14° OWK przed GMP, oraz dla trzech wartości kąta początku wtrysku dawki głównej αII: a) 5°, b) 4°, c) 3° OWK przed GMP

3.2 Charakterystyki zmienności zawartości cząstek stałych dla różnych parametrów wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego.

Dwupaliwowe zasilanie silnika może zdecydowanie wpłynąć na obniżenie emisji cząstek stałych (PM), w porównaniu do emisji uzyskanej na silniku zasilanym standardowo, co jest niewątpliwą zaletą tak zasilanego silnika [1, 8]. Stężenie tego składnika uzależnione jest przede wszystkim od rodzaju paliwa dodatkowego jak i od udziału tego paliwa w procesie spalania. Najlepsze wyniki uzyskuje się zasilając silnik paliwami gazowymi o małej liczbie atomów węgla

(metan, propan, butan), z jak najmniejszym udziałem inicjującej zapłon dawki oleju napędowego. Oznacza to, że w głównej mierze odpowiedzialnym za emisję cząstek stałych jest paliwo standardowe, którego pełne wyeliminowanie nie jest możliwe ze względu na potrzebę inicjacji procesu spalania.



Rys. 5. Charakterystyki zmienności zawartości cząstek stałych w spalinach dla trzech wielkości dawki pilotującej QI 2, 2.5, 3 mg, różnych wartości kąta początku wtrysku αI w przedziale od 30°÷14° OWK przed GMP, oraz dla trzech wartości kąta początku wtrysku dawki głównej αII: a) 5°, b) 4°, c) 3° OWK przed GMP

Wyniki badań wskazują, że maksimum stężenia cząstek stałych przypada na kąt początku wtrysku dawki QI w przedziale 20÷22° OWK przed GMP, zarazem jest on największy dla największej dawki QI. Z racji 70% procentowego udziału energii dostarczanej z gazem naturalnym należałoby oczekiwać zdecydowanej redukcji poziomu stężeń tego składnika w stosunku do poziomu rejestrowanego na samym oleju napędowym, tymczasem jest on ponad dwukrotnie wyższy. Po przeanalizowaniu wyników badań jednoznacznie można wskazać, że mechanizm tworzenia cząstek stałych bardzo wyraźnie zależy od stosowania dawki pilotującej. O ile podczas zasilania dwupaliwowego z dużym udziałem paliwa gazowego dawka pilotująca wydaje się konieczna dla zachowania parametru maksymalnej szybkości narastania ciśnienia na poziomie zbliżonym do uzyskiwanego podczas zasilania standardowego to z punktu widzenia emisji cząstek stałych odgrywa niekorzystną rolę. Wyłączenie dawki pilotującej przy zachowaniu tych samych proporcji: olej napędowy/gaz naturalny, obniża stężenia cząstek stałych do wartości około 3 mg/m^3, co stanowi wyraźną redukcję tego składnika zarówno dla standardowej wersji silnika (22 mg/m^3), oraz w wersji z dwupaliwowym zasilaniem gdzie przekroczona została wartość (50 mg/m^3). Oznacza to, że zastosowanie więcej niż jednej dawki inicjującej proces spalania w silniku zasilanym dwupaliwowo prowadzi do wyraźnego wzrostu emisji cząstek stałych pomimo wyraźnego udziału paliwa gazowego. Dawka pilotująca zatem sprzyja tworzeniu się cząstek stałych. Jest to konsekwencja wtrysku dawki głównej do obszaru objętego działaniem dawki pilotującej. Obszar ten ze względu na podjęty proces spalania inicjowany dawką pilotującą charakteryzuje się wyższą temperaturą i znacznym zubożeniem w tlen. W silniku zasilanym dwupaliwowo z racji mieszaniny powietrza i gazu, do której wtryskiwana jest dawka pilotująca obszar objęty płonieniem będzie większy. Wykorzystanie tlenu w tym obszarze na potrzeby spalania zarówno oleju napędowego jak i części gazu objętego zasięgiem dawki pilotującej również będzie większe. Lokalnie temperatura czynnika, do którego realizowany będzie wtrysk dawki głównej również może być większa. Zatem obszar objęty działaniem dawki pilotującej staje się środowiskiem zubożonym w tlen a zarazem wypełnionym produktami spalania, co w połączeniu z wysoką temperaturą stwarza warunki do powstawania cząstek stałych z porcji oleju napędowego podawanej w dawce głównej. Analizując wyniki pomiarów można zaobserwować, że zarówno zwiększanie jak i zmniejszanie kąta początku wtrysku dawki pilotującej, wykraczając poza obszar maksymalnych stężeń tj. 20°÷22° OWK przed GMP możliwa jest redukcja tego składnika. Zjawisko to jest wyraźne dla wczesnych wartości kąta początku wtrysku. Ponieważ wraz ze wzrostem kąta początku wtrysku dawki pilotującej rośnie dystans dzielący obie dawki pilotującą i główną w związku, z czym jest więcej czasu na przemieszanie się ładunku gaz-powietrze z produktami spalania powstałymi na skutek działania dawki pilotującej. Daje to szansę na dostęp do tlenu oleju napędowego podawanego w dawce głównej a zatem wzięcie udziału w procesie spalania. Ponadto stopniowe odsuwanie wtrysku dawki pilotującej od GMP w kierunku wcześniejszych wartości kąta początku wtrysku doprowadzi do zaniku procesu spalania podejmowanego tą dawką z racji zbyt niskiej temperatury czynnika, do którego wtryskiwana jest dawka. Opóźniając wtrysk dawki pilotującej, któremu towarzyszy skracanie dystansu pomiędzy dawką pilotującą i dawką główną również dochodzi do zaniku wpływu dawki pilotującej na mechanizm tworzenia się cząstek stałych. Jest to spowodowane tym, że dawka główna wtryskiwana jest tuż po dawce pilotującej, która dopiero rozpoczęła proces spalania lub też nie wzięła jeszcze udziału w procesie spalania.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania silnika dwupaliwowego zasilanego gazem naturalnym oraz olejem napędowym w proporcji 70% do 30% energii dostarczanej do silnika przy zachowaniu podziału dawki oleju napędowego, jak ma to miejsce we współczesnych silnikach o zapłonie samoczynnym z układem zasilania typu common rail,

wykazały, że podział dawki oleju napędowego wpływa negatywnie na emisję cząstek stałych tak zasilanego silnika. W artykule wykazano również, że decydujący wpływ na zwiększoną emisję cząstek stałych w silniku zasilanym dwupaliwowo ma dawka pilotująca. Inicjowany dawką pilotującą zapłon sprężanej mieszaniny gazu i powietrza pogarsza warunki utleniania i spalania oleju napędowego wtryskiwanego w kolejnej dawce, co stanowi główną przyczynę podwyższonej emisji cząstek stałych. Wykazano również, że wielkość jak i kąt początku wtrysku dawki pilotującej w sposób istotny zmieniają warunki tworzenia się cząstek stałych. Ponadto w artykule zamieszczono wyniki wpływu zmian parametrów wtrysku oleju napędowego na szybkość narastania ciśnienia spalania, jako parametru decydującego o możliwości zwiększania udziału gazu naturalnego. Wartość tego parametru podobnie jak emisja cząstek stałych silnie zależy od zmienności parametrów wtrysku oleju napędowego. Należy zauważyć, że z punktu widzenia ograniczania maksymalnych szybkości narastania ciśnienia stosowanie podziału dawki oleju napędowego jest pożądane i stanowi skuteczne narzędzie w redukowaniu szybkości narastania ciśnienia, dzięki czemu możliwe jest zwiększanie udziału paliwa dodatkowego, co zgodne jest z koncepcją silnika dwupaliwowego. Badania tego typu pozwolą w przyszłości na stosowanie takich rozwiązań, dzięki którym możliwe będzie kształtowanie procesu spalania z zachowaniem wysokiej sprawności silnika przy jednoczesnym ograniczaniu emisji substancji szkodliwych i eliminowaniem zjawisk niekorzystnych.

Bibliografia:

1. Karago Y., Sandalci T., Koylu U.O., Dalkılıc A.S., Wongwises S.; Effect of the use of natural gas–diesel fuel mixture on performance, emissions, and combustion characteristics of a compression ignition engine, Advances in Mechanical Engineering, Vol. 8(4) 1–13, 2016
2. Ogawa H., Zhao P., Kato T., Shibata G.: Improvement of Combustion and Emissions in a Dual Fuel Compression Ignition Engine with Natural Gas as the Main Fuel, SAE Technical Paper 2015-01-0863, 2015
3. Pawlak G., *The Concept of a Dual Fuel Highly Efficient Internal Combustion Engine*, SAE Technical Paper 01-1480, 2010.
4. Paykani A., Kakaee A.H., Rahnama P., Reitz R.D.: Effects of diesel injection strategy on natural gas/diesel reactivity controlled compression ignition combustion. Energy, Vol. 90: pp. 814-826, 2015
5. Skrzek T., *Assessment of the effect of gaseous fuel delivery mode on thermal efficiency and fuel losses during the valve overlap period in a dual-fuel compression ignition engine,* IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 148 012086 doi:10.1088/1757-899X/148/1/012086, 2016.
6. Skrzek T., *Effect of the diesel fuel dose division and the injection angle on operating parameters of a dual-fuel compression ignition engine,* Combustion Engines No. 3/2015-162.
7. Sundar R. K., Kalyan K. S., Mostafa S. R *The effect of injection parameters and boost pressure on diesel-propane dual fuel low temperature combustion in a single-cylinder research engine,* Journal Fuel, Publisher Elsevier, Vol.184, 2016/11/15.
8. Stelmasiak, Z., Matyjasik, M. *Exhaust emissions of dual fuel self-ignition engine with divided initial dose*, Combustion Engines, 154 (3), 2013.
9. Wei L., Geng P., A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance, Fuel Process Technology, vol. 142: pp. 264–278, February 2016.
10. Yousefi A., Birouk M., *An Investigation of Multi-Injection Strategies for a Dual-Fuel Pilot Diesel Ignition Engine at Low Load*, Journal of Energy Resources Technology, Vol. 139 (1) 2016.
11. Wyniki badań projektu pod tytułem „Nowoczesne instalacje zasilane gazem silników wysokoprężnych w systemie dwupaliwowym – Dual Fuel" firmy ELPIGAZ sp. z o.o. z 2015 roku

Research on the impact of diesel injection parameters on particulate matters emission in a dual-fuel supercharged engine fueled with natural gas

The paper presents the results of research on dual-fuel, compression ignition engine, powered by natural gas. The main objective of the conducted research was to determine the impact of injection parameters initiating the ignition of a diesel oil dose, i.e.: the size and injection timing, on the emission of particulate matters. Studies have shown that when using a split of the diesel dose for the pilot and main dose, despite the significant (70%) share of natural gas in the mixture being combusted, the emission of particulate matters is comparable and even higher than that obtained on standard fuel. Previous studies of the dual-fuel engine showed that there is a clear need to divide the diesel dose into a pilot dose and the main dose. This division significantly affects the course of heat release, and at the same time is an effective method of reducing the maximum rate pressure rise, which allows increasing the share of gaseous fuel. From the point of view of particulate emissions, such division is counterproductive. The obtained results indicate that the values of pilot and main doses and their injection timing significantly affect the conditions of formation of particulate matters.

Keywords: dual fuel engine, natural gas, combustion.

Autorzy:

dr inż. **Tomasz Skrzek** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu Wydział Mechaniczny

mgr. Inż. **Grzegorz Jarzyński** – ELPIGAZ sp. z o.o. – Gdańsk