

Jacek KAŹMIEROWSKI
Ireneusz PIELECHA
Jakub CZAJKA
Krzysztof WISŁOCKI
Przemysław BOROWSKI
Jarosław KAŁUŻNY

PTNSS–2013–SC–117

Investigations of operational and optical indexes of the combustion process for the multiple injection different strategies in CI-type model engine

Abstract: The results of research on the influence of the fuel dose division strategy on the operational and optical indexes of the engine and combustion process have been discussed in the paper. The paper also contains an exhaust gas analysis conducted with the use of a Rapid Compression Machine (RCM). The recorded images related to the period from the onset of injection to the beginning of combustion spots have also been analyzed. The following have been varied: number of doses, the size of doses, dwell times and the excess air coefficient. The author performed a comparative analysis (against the recorded images) of the thermodynamic indexes of the combustion process obtained from the indicator traces ($P_{cyl-max}$, $(dP_{cyl}/dt)_{max}$, delay time of the hot and cold flames).

Keywords: diesel fuel injection, fuel dose division, self-ignition

Wpływ strategii podziału dawki oleju napędowego na termodynamiczne i optyczne wskaźniki spalania w maszynie pojedynczego cyklu

Streszczenie: W artykule omówiono wyniki badań wpływu strategii podziału dawki paliwa na wskaźniki spalania oleju napędowego wraz z analizą spalin z Maszyny Pojedynczego Cyklu. Analizie poddano także materiał zdjęciowy dotyczący okresu od początku wtrysku dawki paliwa do początku wystąpienia ognisk spalania. Dokonano wariantowania liczby dawek ich wielkości oraz czasów przerw między nimi, a także współczynnika nadmiaru powietrza. Dokonano oceny porównawczej wskaźników termodynamicznych procesu spalania uzyskanych z wykresu indykatorowego ($P_{cyl-max}$, $(dP_{cyl}/dt)_{max}$, czas opóźnienia zimnych i gorących płomieni) w zestawieniu z materiałem filmowym.

Słowa kluczowe: wtrysk oleju napędowego, podział dawki, samozapłon

1. Wprowadzenie

Postęp w dziedzinie spalania w silnikach o zapłonie samoczynnym determinuje obecnie konieczność spełnienia jednocześnie wielu często sprzecznych wymagań. Wśród nich wymienić należy spełnienie norm środowiskowych w odniesieniu do emisji spalin przy jednoczesnym zachowaniu odpowiednich wartości termodynamicznych procesu spalania oraz zużycia paliwa. Powyższe wymagania związane są z określonymi strategiami podziału dawki paliwa.

Wcześniejsze prace autorów dotyczyły zagadnień zarówno wtrysku paliwa [11–14], jak również badań podstawowych spalania oleju napędowego w układach o zapłonie samoczynnym [9]. Obecnie prowadzone prace dotyczą połączenia tych zagadnień w aspekcie wpływu sposobu podziału dawki oleju napędowego na początkowe stadia samozapłonu.

Analiza literatury dotycząca stosowania najnowszych rozwiązań w dziedzinie podziału dawki paliwa wskazuje na następujące fakty:

a) Analiza literatury [3] wykazuje, że podział wtryskiwanego paliwa na dwie dawki ma znaczący wpływ na emisję HC i CO. W sytuacji kiedy pierwsza dawka jest większa od drugiej, zaobserwowano zwiększenie emisji węglowodorów oraz tlenków azotu przy jednoczesnym zmniejszeniu emisji cząstek stałych. Zwiększenie dawki pilotującej spowodowało także nasilenie hałasu spalania oraz emisji NO_x . Efekty te zredukowano zwiększając czas przerwy między dawkami. Podobne efekty zauważono podczas badań [7] przy zastosowaniu niewielkiej dawki pilotującej. Badania przedstawione w [2, 15] wskazują także na zmniejszenie emisji cząstek stałych PM;

b) Wyniki badań przedstawione w [5, 15] wskazują na poprawę spalania paliwa, a w efekcie obniżenie zużycia paliwa przy zastosowaniu podziału dawki w stosunku do spalania pojedynczej dawki;

c) Z badań przedstawionych w [7] wynika zależność emisji NO_x od wielkości pierwszej dawki: duża pierwsza dawka zwiększa homogeniczność

ładunku, zmniejszenie emisji NO_x można uzyskać opóźniając wtrysk głównej dawki paliwa. W sytuacji kiedy zwiększono kąt wyprzedzenia wtrysku pierwszej dawki o $20\text{-}25^\circ$ zaobserwowano mniejszą emisję HC i CO;

d) Analiza literatury [3, 16] odnosi się do silnika, w który zastosowano system recyrkulacji spalin. Podczas pracy silnika dostarczone jest mniej tlenu w powietrzu, a zastosowanie podziału dawki paliwa spowodowało poprawę mieszania się paliwa z powietrzem w cylindrze. Dzięki zastosowaniu podziału dawki uzyskano spadek emisji NO_x oraz PM.

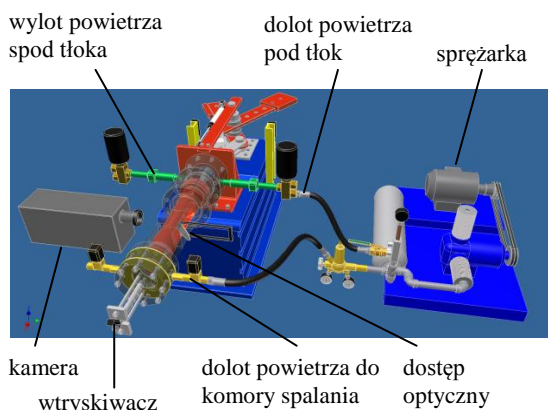
e) Przedstawione w [10] wyniki badań wskazują, że zastosowanie 25% masy wtryskiwanego paliwa w ostatniej dawce może spowodować zmniejszenie emisji cząstek stałych.

Autorskie badania wykorzystujące wiedzę dotyczącą tych aspektów pozwoliły na ocenę procesów spalania i jego wskaźników termodynamicznych w powiązaniu z emisją spalin. Badania optyczne procesów spalania stanowiły uzupełnienie badań indykatorowych i pozwoliły na określenie intensywności tworzenia się ognisk samozapłonu (gorących płomieni) w zależności od zastosowanej strategii wtrysku.

2. Metodyka badań

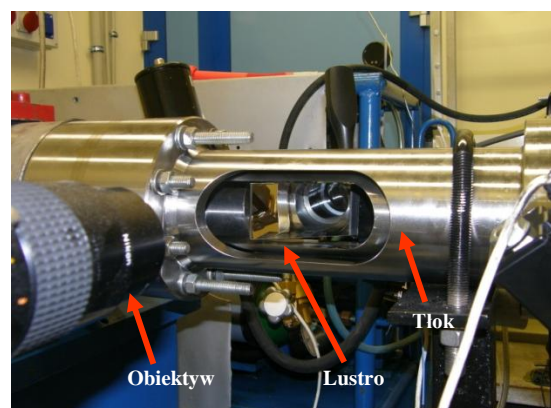
2.1. Obiekty badawcze

Problematyka zagadnień dotyczących podziału dawki paliwa i jego spalania prowadzona była z wykorzystaniem Maszyny do Pojedynczego Cyklu spalania (MPC) – rys. 1. Parametry układu szczegółowo opisano w pracy [14]. Zawarte informacje wskazują na możliwość odwzorowania w MPC parametrów termodynamicznych procesu samozapłonu panujących w rzeczywistym silniku spalinowym. Pneumatyczne wymuszenie ruchu tłoka (o wartości 5 MPa) pozwalało na uzyskanie ciśnienia sprężania na poziomie 4 MPa). Wartości ciśnienia sprężania odpowiadają typowym, uzyskiwanym w silnikach o ZS z bezpośrednim wtryskiem paliwa.



Rys. 1. Maszyna do pojedynczego cyklu spalania wykorzystana do badania rozwoju samozapłonu

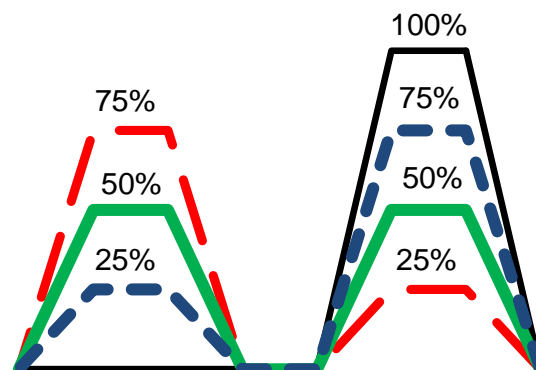
Badania procesu spalania (rozwoju ognisk samozapłonu) prowadzono przy wykorzystaniu kamery do zdjęć szybkich High Speed Star 5 firmy LaVision. Badania prowadzono przy częstotliwości filmowania $f = 5 \text{ kHz}$, co pozwalało na uzyskanie obrazów z przesunięciem czasowym o wartości $t = 0,2 \text{ ms}$ o rozdzielczości obrazu 768×768 pikseli. Dostęp optyczny do komory spalania realizowano od strony denka tłoka przez szkło kwarcowe wykorzystując odpowiednie okna w części prowadzącej cylindra.



Rys. 2. Dostęp optyczny do komory spalania w maszynie do pojedynczego cyklu spalania

2.2. Sposób prowadzenia badań

W badaniach dokonano wariantowania liczby dawek (1 lub 2 dawki), wielkości dawek (3 nastawy: w proporcjach 0/100; 25/75; 50/50 oraz 75/25), czasów przerw między nimi (2 nastawy: 7 i 14 ms) oraz współczynnika nadmiaru powietrza (3 nastawy: $\lambda = 1,23$; 2,0 oraz 3,0) – rys. 3. Na podstawie badań empirycznych dokonano oceny porównawczej wskaźników termodynamicznych procesu spalania uzyskanych z wykresu indykatorowego ($P_{\text{cyl-max}}$, $(dP_{\text{cyl}}/dt)_{\text{max}}$, czasu opóźnienia zimnych i gorących płomieni) w zestawieniu z materiałem filmowym.



Rys. 3. Strategie podziału dawki stosowane w badaniach spalania oleju napędowego w MPC

Tabela 1. Plan badań wtrysku i spalania w MPC

Badania optyczne				
q _{pilot} [%]	0			
q _{główna} [%]	100			
t _{wtr} [ms]	0,3	0,6	0,9	
P _{wtr} [MPa]	50		100	
Badania indykatrowe				
q _{pilot} [%]	0	25	50	75
q _{główna} [%]	100	75	50	25
q _o [mg] @ P _{wtr} [MPa]	9,4 mg @ 30 MPa 14,0 mg @ 50 MPa 23,3 mg @ 80 MPa			

Warunki panujące w cylindrze podczas wtrysku poszczególnych dawek określono na podstawie wykresu indykatrowego ciśnienia w cylindrze.

Pierwszy przypadek: wczesny wtrysk pilotujący:

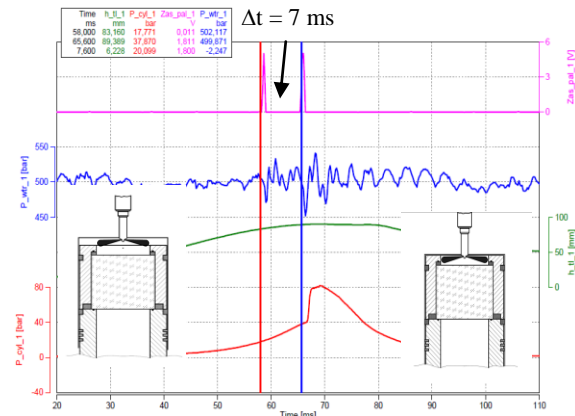
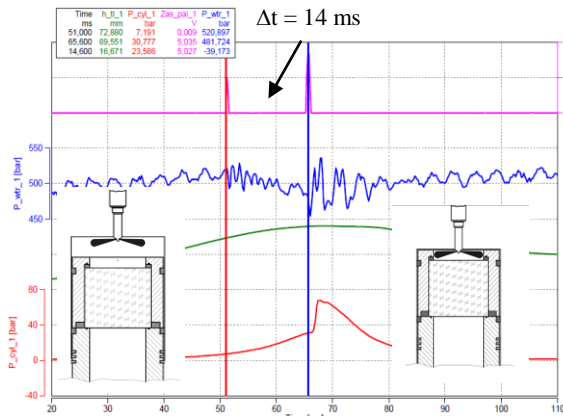
Czas między dawkami: 14 ms

Położenie tłoka podczas wtrysku dawki pilotującej:
17 mm przed GMP

Temperatura w cylindrze podczas wtrysku:

a) dawki pilotującej: 610 ±10 K

b) dawki głównej: 775 ±10 K



Rys. 4. Warunki geometryczne położenia tłoka podczas wtrysku dwuczęściowego z różnymi odległościami między dawkami wtryskiwanego paliwa

Drugi przypadek: późny wtrysk pilotujący:

Czas między dawkami: 7 ms

Położenie tłoka podczas wtrysku dawki pilotującej:

7 mm przed GMP

Temperatura w cylindrze podczas wtrysku:

a) dawki pilotującej: 700 ±10 K

dawki głównej: 775 ±10 K

- t-EOI-P – zarejestrowany czas hydraulicznego zamknięcia wtryskiwacza określony na podstawie ciśnienia wtryskiwanego paliwa P_{wtr} (zwiększenia wartości),
- t-HDI-P = t-SOI-P – t-ctrPB – czas hydraulicznego opóźnienia otwarcia wtryskiwacza;

b) dla dawki głównej

- t-ctrMB – zarejestrowany czas elektrycznego otwarcia wtryskiwacza,
- t-ctrME – zarejestrowany czas elektrycznego zamknięcia wtryskiwacza,
- t-ctrM = t-ctrME – t-ctrMB – czas elektrycznego otwarcia wtryskiwacza
- t-SOI-M – zarejestrowany czas hydraulicznego otwarcia wtryskiwacza określony na podstawie ciśnienia wtryskiwanego paliwa P_{wtr} (spadku wartości),
- t-EOI-M – zarejestrowany czas hydraulicznego zamknięcia wtryskiwacza określony na podstawie ciśnienia wtryskiwanego paliwa P_{wtr} (zwiększenia wartości),
- t-HDI-M = t-SOI-M – t-ctrMB – czas hydraulicznego opóźnienia otwarcia wtryskiwacza;

2.3. Sposób przedstawienia wyników

Analiza wtrysku oleju napędowego wymagała określenia wielkości podstawowych dotyczących wtrysku paliwa: dawki pilotującej i głównej (rys. 5). Podobne wielkości określono w celu opisu procesu spalania.

a) dla dawki pilotującej:

- t-ctrPB – zarejestrowany czas elektrycznego otwarcia wtryskiwacza,
- t-ctrPE – zarejestrowany czas elektrycznego zamknięcia wtryskiwacza,
- t-ctrP = t-ctrPE – t-ctrPB – czas elektrycznego otwarcia wtryskiwacza
- t-SOI-P – zarejestrowany czas hydraulicznego otwarcia wtryskiwacza określony na podstawie ciśnienia wtryskiwanego paliwa P_{wtr} (spadku wartości),

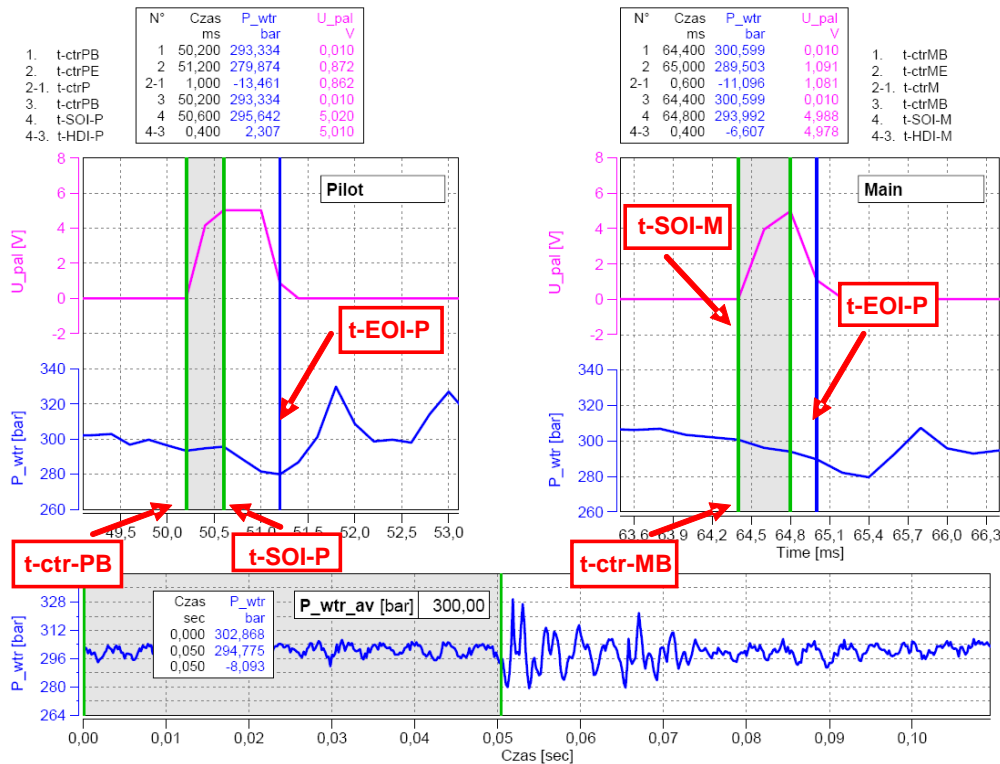
c) dla spalania:

- t-SoCFC – czas termodynamicznego rozpoczęcia zimnego spalania (tzw. zimnych płomieni) określony na podstawie wzrostu wykładnika politropy sprężania (wyznaczonego na podstawie ciśnienia w cylindrze),
- t-SOC-M – czas termodynamicznego rozpoczęcia spalania dawki głównej; określony na podstawie zmiany wykładnika politropy sprężania, którego istotny wzrost wskazuje na dodatnie wywiązywanie ciepła.

Wartości ciśnienia indykowanego wyznaczono na podstawie równania:

$$P_i = \frac{\sum P_{cyl} \cdot \Delta V}{V_{End} - V_0}$$

gdzie: V_0 jest objętością cylindra podczas rozpoczęcia ruchu tłoka, a V_{End} – objętością podczas zakończenia rozprężania; czas tych zmian określono na 110 ms.



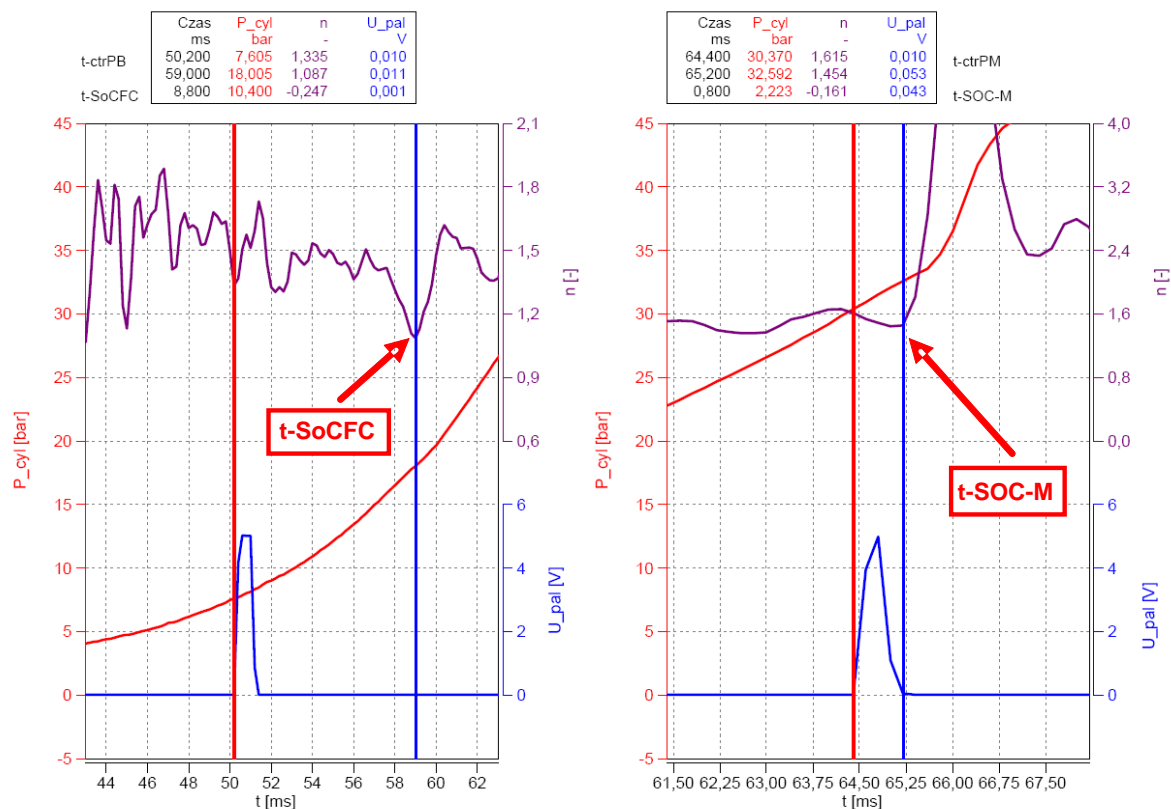
Rys. 5. Określenie wielkości dotyczących wtrysku dawki pilotującej i zasadniczej

Przedstawione na rys. 5 punkty charakterystyczne wykresu wskazują na istotność zagadnienia dotyczącego hydraulicznego opóźnienia otwarcia wtryskiwacza podczas wtrysku. Warunki takie mają szczególne znaczenie przy określaniu odległości między dawkami wtryskiwanego paliwa. Wielkość hydraulicznego opóźnienia wtrysku poszczególnych dawek ma wpływ na czas trwania wtrysku i jednocześnie na wielkość dawki paliwa wtryskiwanej w każdej z części wtrysku wieloczęściowego. Podczas prowadzonych badań hydrauliczne opóźnienie wtrysku zarówno dawki pilotującej jak i zasadniczej wynosiło 0,4 ms. Jest to wartość, która może odpowiadać czasowi wtrysku minimalnej wielkości dawki pilotującej. Analiza czasów wtrysku z rys. 5 wskazuje, że niezależnie od wielkości dawek paliwa uzyskano stałą wartość hydraulicznego opóźnienia rozpoczęcia wtrysku co można uznać za błąd systematyczny. Wynika on z charakterystyki dzia-

łania wtryskiwacza i był niezależny od czasów i ciśnienia wtrysku paliwa.

Wyznaczenie punktów charakterystycznych procesu spalania polegało na określeniu rozpoczęcia zimnego spalania (tzw. zimnych płomieni) dawki pilotującej oraz rozpoczęcia spalania głównej dawki paliwa (rys. 6).

Z zamieszczonych danych wynika, że istnieje – na podstawie wykładnika politropy – możliwość określenia zimnych i gorących płomieni uwzględniając badania indykatorowe. Jednakże na podstawie takich badań uzyskuje się wielkości średnie procesu, co nie pozwala na ich pełną charakterystykę. Z tego powodu do określenia czasu rozpoczęcia gorących płomieni (spalania płomieniowego) wykorzystano badania optyczne przedstawione w dalszej części artykułu.



Rys. 6. Warunki wyznaczania zimnych i gorących płomieni odpowiednio dla wtrysku pilotującego oraz głównego

3. Ocena procesu spalania

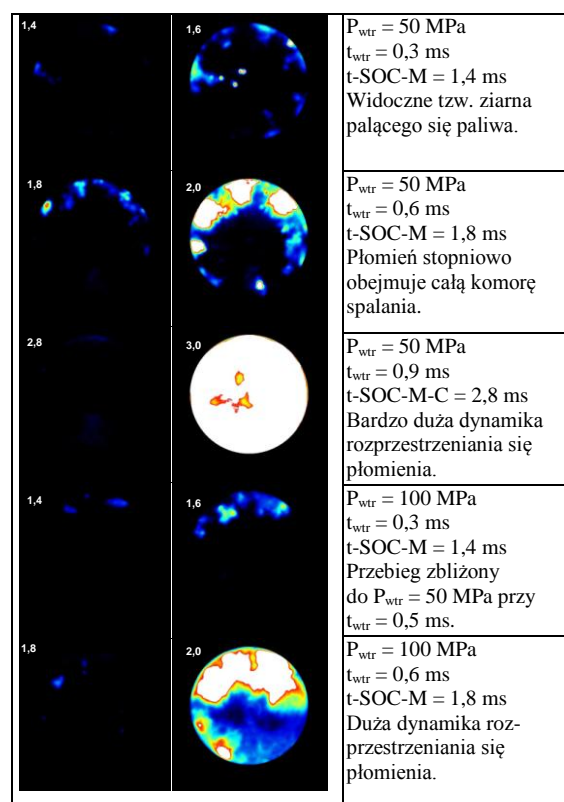
3.1. Analiza badań optycznych

Optyczną analizę procesu rozwoju samozapłonu prowadzono dla zróżnicowanych ciśnień wtryskiwanego paliwa a także dla różnych czasów wtrysku. Czasy dobrano tak, aby uzyskać odpowiednie dawki stosowane przy wtrysku dwuczęściowym.

Analiza materiału zdjęciowego z rys. 7 wskazuje na zwiększenie intensywności rozwoju procesów wczesnopłomiennych (gorących płomieni) podczas wtrysku dużej dawki paliwa lub przy zwiększonych ciśnieniach paliwa. Analiza zdjęć wskazuje na istnienie zależności między wielkością dawki paliwa a czasem opóźnienia samozapłonu. Na podstawie materiału filmowego stwierdzono, że czas opóźnienia gorących płomieni dawki głównej (t-SoC-M) jest krótszy podczas wtrysku niewielkich dawek paliwa. Stwierdzenie to jest słuszne dla czasu opóźnienia gorących płomieni zarówno podczas wtrysku paliwa o ciśnieniu 50 MPa oraz podczas wtrysku paliwa przy ciśnieniu 100 MPa.

3.2. Wyniki badań indykatorowych

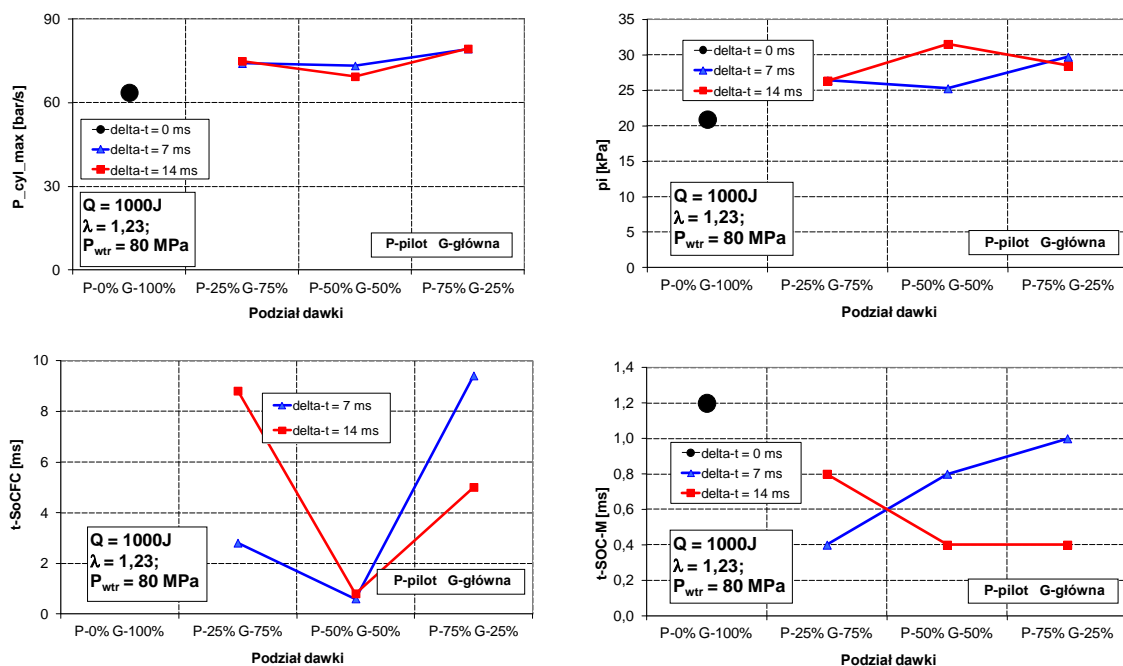
Badania indykatorowe przeprowadzono zgodnie planem badań zawartym w tabelicy 2. Dodatkowo – co przedstawiono w punkcie 2.2 na rys. 4 dokonano badań z dwoma czasami przerwy między wtryskiwanymi dawkami paliwa (7 oraz 14 ms). Badania z



Rys. 7. Analiza procesu samozapłonu oleju napędowego dokonana przy różnych ciśnieniach i czasach wtrysku paliwa

podziałem dawki zestawiono z badaniami z pojedynczą dawką paliwa. Uzyskano wskaźniki procesu spalania w postaci maksymalnego ciśnienia w cylindrze P_{cyl_max} , średniego ciśnienia indykowanego p_i wyznaczonego na podstawie wzoru (1) oraz czasów pojawienia się zimnych (t-SoCFC) oraz gorących płomieni (t-SOC-M). Czasy te dotyczą odpowiednio pilotującej i głównej dawki paliwa – rys. 8.

Analiza maksymalnego ciśnienia w cylindrze wskazuje na istnienie możliwości uzyskania większych wartości podczas stosowania podziału dawki paliwa. Jednak zróżnicowanie odległości czasowych między dawkami w niewielkim stopniu wpływa na uzyskiwane wartości P_{cyl_max} . Zwiększenie udziału dawki pilotującej prowadzi do uzyskiwania największych ciśnień w cylindrze. Jednak



Rys. 8. Wskaźniki spalania podczas zróżnicowanego podziału dwuczęściowego wtrysku dawki paliwa

skutkuje skróceniem okresu opóźnienia zimnych płomieni. Niestety zwiększenie dawki pilotującej w stosunku 75%/25% do dawki głównej nie skutkuje zachowaniem tej tendencji. Wcześniej wtrysnięta dawka pilotująca o dużej masie uzyskuje krótszy czas opóźnienia zimnych płomieni.

Okres opóźnienia gorących płomieni wyznaczono dla wszystkich typów wtrysniętych dawek paliwa (z podziałem i bez). Wtrysk dawki bez podziału skutkuje najdłuższym czasem opóźnienia gorących płomieni. Zwiększenie dawki pilotującej zwiększa opóźnienie wystąpienia gorących płomieni tylko w przypadku późnego wtrysku tej dawki (krótszy czas między dawkami). Jest to spowodowane brakiem dostatecznej ilości czasu na właściwe odparowanie i rozpylenie pierwszej dawki. Może to równocześnie oznaczać, że druga dawki osiąga położenie pierwszej dawki i zwiększa stężenie

analiza średniego ciśnienia indykowanego wskazuje, że maksymalną pracę obiegu uzyskuje się podczas proporcjonalnego podziału dawki paliwa przy zwiększonej odległości między dawkami. Najmniejsze wartości tego wskaźnika uzyskano przy braku podziału dawki paliwa.

Czas pojawienia się zimnych płomieni jest określony tylko dla podzielonej dawki paliwa gdyż dotyczy wtrysku pilotującego. Najkrótsze czasy niezależnie od odległości między dawkami paliwa uzyskano przy jednakowym podziale dawki. Przy małej dawce pilotującej zimne płomienie pojawiają się wcześniej, gdy odległości między dawkami są mniejsze. Oznacza to, że dawka pilotująca jest wtryskiwana do większej temperatury ładunku, co

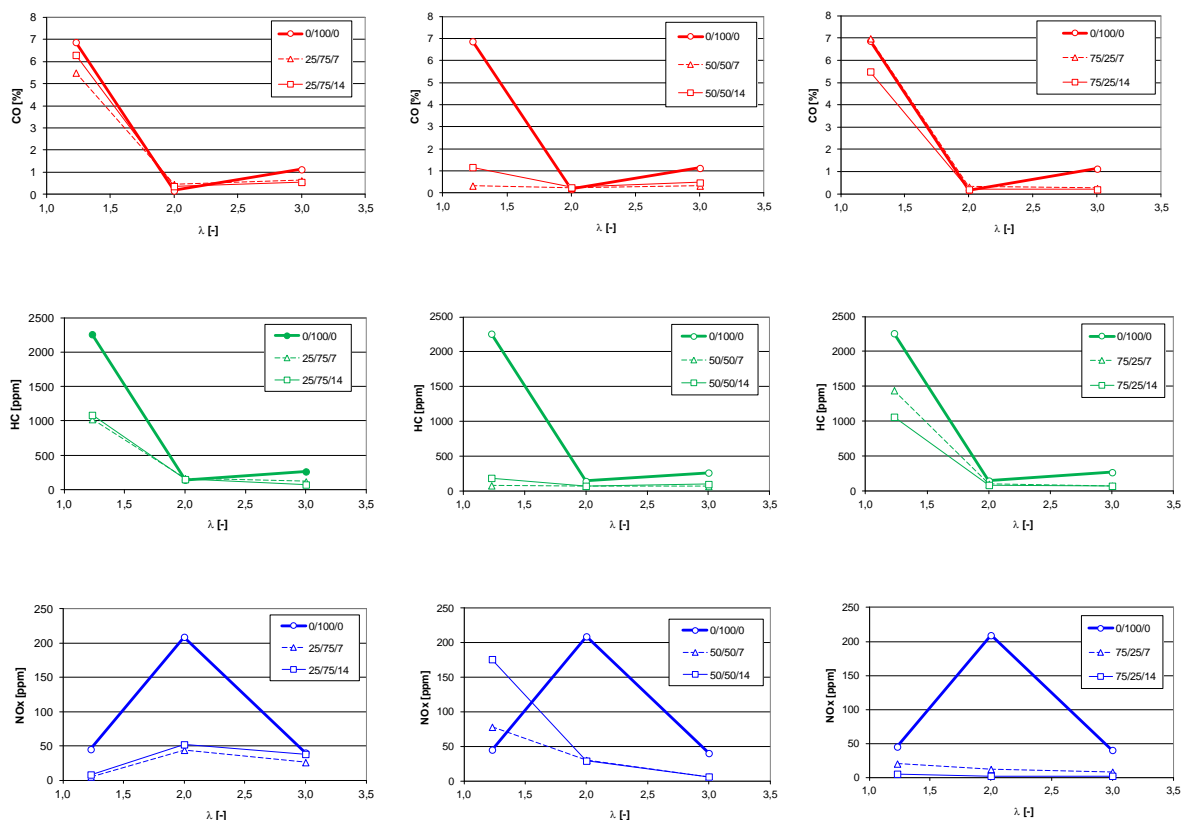
paliwa w określonych obszarach komory spalania. Zmiana wielkości dawki wstępnej przy jej wczesnym wtrysku powoduje, że okres opóźnienia gorących płomieni nie ulega zmianie. Oznacza to, że podczas takiego wtrysku dysponuje się dostatecznie długim czasem od rozpoczęcia wtrysku dawki wstępnej. Czas wystąpienia gorących płomieni jest niezależny od wielkości dawki głównej.

4. Wpływ strategii podziału dawki na emisję spalin w MPC

Badania spalania i analizę wskaźników tego procesu poparto analizą stężenia składników spalin podczas pracy MPC. Analiza składników spalin jest utrudniona ze względu na to, że badaniom poddawana jest mała próbka spalin, której przepływ nie jest ciągły. Z tego powodu badania powtarzano

3-krotnie prezentując wartość średnią z tych pomiarów. Analiza rozrzutów wskazuje na istnienie 10% zmian podczas pomiarów stężenia składników spalin w punkcie pomiarowym. W badaniach wykorzystano analizator składników gazowych spalin, którego rozdzielczość pomiarowa wynosi odpowiednio: dla CO – 0,01%, HC – 10ppm oraz NO_x – 2 ppm. Analizie poddano wartości stężenia uzyska-

ne podczas badań przy zasilaniu dawką o ciśnieniu 80 MPa i czasie wtrysku 1,2 ms podzielonym w odpowiednich proporcjach przedstawionych na rys. 9. Wyniki badań przedstawiono dla trzech współczynników nadmiaru powietrza: 1,23; 2,0 oraz 3,0. Na rys. 9 zaprezentowano wyniki uszeregowane w postaci stałych podziałów dawki paliwa dla dwóch czasów przerwy między dawkami.



Rys. 9. Wyniki stężenia szkodliwych składników spalin podczas zróżnicowanego podziału dawki paliwa i zmiennych wartości współczynnika nadmiaru powietrza ($P_{wtr} = 80 \text{ MPa}$; $\lambda = 1,23; 2,0; 3,0$)

Wtrysk małej dawki pilotującej (25%) o niewielkich odstępach między dawkami wskazuje na zmniejszenie stężenia CO szczególnie w zakresie małych i dużych współczynników nadmiaru powietrza.

Podobne tendencje zaobserwowano dla stężenia węglowodorów i tlenków azotu. Charakterystyczne jest występowanie najmniejszych wartości stężenia poszczególnych składników spalin przy spalaniu ładunku ze współczynnikiem nadmiaru powietrza $\lambda = 2$. Uzyskiwane przy takim współczynniku nadmiaru powietrza wartości stężenia CO i HC są niezależne pod sposobu podziału dawki paliwa oraz dla dawki bez podziału. Charakterystycznym zjawiskiem jest występowanie maksymalnych wartości stężenia tlenków azotu przy współczynniku $\lambda = 2$. Oznacza to najlepszy przebieg spalania, ze względu na dopalanie tlenku węgla i jednocześnie występowanie dużych temperatur maksymalnych procesu.

Temperatury te sprzyjają tworzeniu znacznych ilości tlenków azotu.

Prowadzone badania dowodzą znacznych możliwości obniżenia stężenia składników szkodliwych spalin przy podziale dawki paliwa. Jednakże wskazują na znacznie większe korzyści ze stosowania doładowania. Wskazują na to zbliżone wartości stężenia CO i HC oraz NO_x przy podziale dawki paliwa podczas spalania ładunków ubogich ($\lambda = 3$).

5. Podsumowanie

Przedstawione badania wskazują na możliwości zastosowania podziału dawki paliwa w systemach spalania silników o zapłonie samoczynnym.

Prowadzone badania i ich analizy pozwalają sformułowanie kilku wniosków:

a) czas wystąpienia zimnych płomieni jest najkrótszy podczas równomiernego podziału dawki

paliwa i wtedy jest niezależny od odległości między dawkami wtrysniętego paliwa;

b) czas pojawienia się gorących płomieni możliwy jest do określenia na podstawie analizy wykresu indykatorowego, jednak lepsze rezultaty przynosi analiza optyczna procesu; czasy pojawienia się gorących płomieni są mniejsze podczas zwiększonych odległości czasowych między dawkami wtrysniętego paliwa;

c) podział dawki paliwa przyczynia się do ograniczenia stężenia składników szkodliwych spalin. Najbardziej korzystne ekologicznie jest

stosowanie współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda = 2$, przy którym wpływ podziału dawki paliwa jest najmniej istotny biorąc pod uwagę stężenie toksycznych składników spalin. Najlepsze rezultaty ograniczenia stężenia tlenków azotu uzyskuje się przy podziale dawki paliwa 25/75% przy stosowaniu małych współczynników nadmiaru powietrza. Zwiększenie współczynnika nadmiaru powietrza powoduje, że możliwe jest stosowanie dowolnego podziału dawki paliwa, który nie zwiększa w znaczący sposób stężenia składników spalin.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

$(dP_{cyl}/dt)_{max}$	maksimum cylinder pressure rate/maksymalna szybkość narastania ciśnienia w cylindrze	t-SoCFC	time of cold flame combustion (pilot injection)/czas uzyskania zimnych płomieni
f	frequency/częstotliwość	t-SOC-M	time of hot flame combustion (main injection)/czas uzyskania gorących płomieni (dawka zasadnicza)
MPC	Rapid Compression Machine/Maszyna do Pojedynczego Cyklu spalania	λ	excess air ratio/współczynnik nadmiaru powietrza
$P_{cyl-max}$	maksimum cylinder pressure/maksymalne ciśnienie w cylindrze		
q_o	fuel dose/dawka paliwa		

Bibliography/Literatura

- [1] Andre M., Walter B., Bruneaux G., Foucher F., Monuaim-Rousselle C.: Optimizing Early Injection Strategy for Diesel PCCI Combustion, SAE Technical Paper 2009-01-2731.
- [2] Beatrice C., Del Giacomo N., Guido C.: Benefits and Drawbacks of Compression Ratio Reduction in PCCI Combustion Application in an Advanced LD Diesel Engine, SAE Technical Paper 2009-01-1447.
- [3] Benejes J., Molina S., Novella R., Amorim R., Ben H., Hamouda H., Hardy J.P.: Comparison of two injection systems in an hsdiesel engine using split injection and different injector nozzles, International Journal of Automotive Technology, Vol. 11, No. 2, pp. 139-146 (2010).
- [4] Kook S., Bae C.: Combustion Control Using Two-Stage Diesel Fuel Injection in a Single-Cylinder PCCI Engine, SAE Technical Paper 2004-01-0938.
- [5] Mendez S., Thiouard B.: Using Multiple Injection Strategies in Diesel Combustion: Potential to Improve Emissions, Noise and Fuel Economy Trade-Off in Low CR Engines, SAE Technical Paper 2008-01-1329.
- [6] Park C., Kook S., Bae C.: Effects of Multiple Injections in a HSDI Diesel Engine Equipped with Common Rail Injection System, SAE Technical Paper 2004-01-0127.
- [7] Peng Z., Liu B., Wang W. i in.: CFD Investigation into Diesel PCCI Combustion with Optimized Fuel Injection, Energies (4) 2011.
- [8] Pielecha I., Wislocki K., Czajka J., Maslennikov D.: Determination of the self-ignition delay for different types of diesel fuels. W2P014, 34th International Symposium on Combustion, Warszawa 2012.
- [9] Pielecha I., Wislocki K., Czajka J., Maslennikov D.: Investigations into spray formation for different types diesel fuels. W2P132, 34th International Symposium on Combustion, Warszawa 2012.
- [10] Poorghasemi K., Ommi F., Yaghmaei H., Namaki A.: An investigation on effect of high pressure post injection on soot and NO emissions in a DI diesel engine, Journal of Mechanical Science and Technology, 26(1) 2012.
- [11] Wislocki K., Pielecha I., Czajka J., Stobnicki P.: Experimental and numerical investigations into diesel high-pressure spray – wall interaction under various ambient conditions. SAE 2012 International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting, SAE Technical Paper 2012-01-1662, Malmo, Sweden.
- [12] Wislocki K., Pielecha I., Czajka J., Maslennikov D.: Fuel spray parameter analysis for different common-rail injectors. FISITA 2010 World Automotive Congress, Automobiles and Sustainable Mobility, Budapest, Hungary, 2010.
- [13] Wislocki K., Pielecha I., Czajka J., Maslennikov D.: Investigation Based Assessment of the Influence of the Injection Parameters on the Fuel Spray Development and Fuel

Atomization for Diesel Engine Piezoelectric Injectors. THIESEL 2010 Conference on Thermo- and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines, Valencia, Spain, 2010.

- [14] Wisłocki K., Pielecha I., Czajka J., Maslennikov D., J. Kaźmierowski: The assessment of the usefulness of a Rapid Compression Machine in optical research on the injection and combustion processes of liquid fuels. *Combustion Engines*, No. 4(143) 2010.

Mr Jacek Kaźmierowski, MEng. – postgraduate in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Mgr inż. Jacek Kaźmierowski – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.



Mr Jakub Czajka, DEng. – Doctor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Dr inż. Jakub Czajka – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.



Mr Przemysław Borowski, MEng. – postgraduate in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Mgr inż. Przemysław Borowski – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.



- [15] Weiskirch C., Muller E.: Advances in Diesel Engine Combustion: Split Combustion, SAE Technical Paper 2007-01-0178.

- [16] Yu W., Liu B., Li Y., Su Q., Pei Y., Su W.: A Hybrid Combustion Control Strategy for Heavy Duty Diesel Engines Based on the Technologies of Multi-Pulse Injections, Variable Boost Pressure and Retarded Intake Valve Closing Timing, SAE Technical Paper 2011-01-1382.

Mr Ireneusz Pielecha, DSc., DEng. – doctor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Dr hab. inż. Ireneusz Pielecha – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.



Prof. Krzysztof Wisłocki, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Dr hab. inż. Krzysztof Wisłocki, prof. PP – profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.



Mr Jarosław Kałużny, DEng. – Doctor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Dr inż. Jarosław Kałużny – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

