

Examination of the influence of multi-injection strategy on thermodynamic indexes of engine cycle and on the emission of toxic compounds

The main target of this work was to investigate on the 1-cyl. research engine concerning practical realization possibilities of cold-flame-combustion when operating with high and very high Exhaust Gas Recirculation (EGR) rates. After determining of possibilities of lowering NO_x and Soot emissions for EGR rates ca. 40-60% some further investigation on optimization of SOI and CoC parameters were performed. Additionally, some preliminary investigations of the optimization of combustion parameters when applying various strategies of multi-injection have been conducted and analyzed.

Key words: diesel engine, exhaust gas recirculation, low temperature combustion, injection strategies

Badanie wpływu strategii wieloczęściowego wtrysku paliwa na termodynamiczne wskaźniki pracy silnika i na emisję składników spalin

Głównym celem badań było uzyskanie efektu spalania niskotemperaturowego skutkującego zmniejszeniem emisji NO_x wraz z jednoczesnym zmniejszeniem emisji sadzy (cząstek stałych) dzięki zastosowaniu dużego stopnia recyrkulowanych spalin. Po uzyskaniu możliwości obniżenia emisji NO_x i sadzy przy zastosowaniu recyrkulacji spalin o udziale 40-60%, prowadzono dalsze badania nad optymalizacją parametrów SOI i CoC. Dodatkowo, prowadzono wybrane wstępne badania optymalizacyjne parametrów procesu spalania przy stosowaniu różnych strategii wtrysku wieloczęściowego.

Słowa kluczowe: silnik ZS, EGR, niskotemperaturowe spalanie, strategię wtrysku paliwa

1. Introduction and motivation for the research

Reducing emissions of exhaust gas toxic compounds is now mainly possible in two ways. There are: applying the internal engine methods (e.g. exhaust gas recirculation systems, modern combustion systems) or by use of engine external methods like exhaust aftertreatment systems [6–9]. It is possible to apply external exhaust gas recirculation systems (low and high pressure) and internal exhaust gas recirculation. Emissions standards impose the search for new concepts of the combustion process. To these may include homogeneous combustion systems (HCCI – Homogeneous Charge Compression Ignition) or low temperature combustion (LTC – Low Temperature Combustion). It is also possible to use exhaust aftertreatment systems containing DOC (Diesel Oxidation Catalyst), DPF (Diesel Particle Filter), SCR (Selective Catalytic Reduction), or a combination thereof [6–9].

1. Wprowadzenie i uzasadnienie badań

Ograniczenie emisji składników szkodliwych spalin jest obecnie głównie możliwe dwoma sposobami. Są to: zastosowanie wewnątrzsilnikowych sposobów ich ograniczania (np. układy recyrkulacji spalin, nowoczesne systemy spalania) lub przez zastosowanie pozasilnikowych układów oczyszczania spalin [6–9]. Możliwe jest stosowanie układów zewnętrznej (nisko i wysokotemperaturowej) i wewnętrznej recyrkulacji spalin. Standardy emisji spalin wymuszają poszukiwanie nowych koncepcji procesu spalania. Do nich można zaliczyć układy spalania homogenicznego (HCCI – Homogeneous Charge Compression Ignition) lub spalanie niskotemperaturowe (LTC – Low Temperature Combustion). Możliwe jest stosowanie układów oczyszczania spalin zawierających systemy DOC (Diesel Oxidation Catalyst), DPF (Diesel Particle Filter), SCR (Selective Catalytic Reduction) lub ich kombinacji [6–9].

Table 1. Control parameters of engine operating points suggested by Volkswagen

Table 1. Control parameters of engine operating points suggested by Volkswagen

	engine speed/prędkość obrotowa	injection quantity/dawka paliwa	center of combustion/centrum spalania	injection pressure/ciśnienie wtrysku	intake manifold pressure/ciśnienie w kolektorze dolotowym	EGR cooled/udział spalin chłodzonych	$P_{\text{Compression}}$
	[rpm]	[mg/stroke]	[°CA aTDC]	[bar]	[mbar]	[%]	[bar]
1	1000	12	9	440	1017	0-50	36-38
2	1500	12	10	600	1017	0-59.2	36-38
3	1500	23	11	1200	1213	0-64.8	36-38
4	2000	17	8	1180	1120	0-56.5	36-38

One of the most desirable solution to control the combustion process is using e.g. a low temperature combustion to reduce emissions of nitrogen oxides and particles. This concept is based on the reduction of the combustion temperature (leading to reduction of the production of NO_x by the use of a high share of recirculated exhaust gases) with a concomitant reduction of the compression ratio [3, 4]. Such conditions increase the period of mixing the fuel and at the same time extend the self ignition delay of fuel. For this reason, it becomes necessary to use the strategy of division of fuel dose for simultaneous reducing of emissions of hydrocarbons and carbon monoxide.

Applying of fuel dose division in the LTC system [1] has allowed further reduction of emissions of hydrocarbons and carbon monoxide. In the case of small loads, it is achieved by reducing of the time of the interval between doses and reducing of the size of the second dose (up to a size of 20%). By medium and high loads the further reducing of the sound level generated by the combustion process has been achieved by use of the injection of two doses, so as to achieve two-stage combustion.

Current works also apply to application of dual fuel systems: diesel, gasoline and ethanol [2], where the petrol fuel was injected into the intake manifold with the significant participation of the recirculated exhaust gas. Regardless of the fuel mixtures (petrol-diesel or E85-diesel fuel) identical start of combustion was achieved, wherein E85-diesel fuel mixture was combusted with small share of EGR and smaller amount of fuel dose injected into the intake manifold. A mixture of petrol-diesel allowed to obtain a two-stage combustion, and combustion of a E85-diesel mixture resulted in a high one-stage of the heat release.

2. Main problem and methodology of research

The research was created on 1-cylinder research engine for determining of it operational parameters for different EGR-rates varying from 0% up-to 60% of exhaust gases. Main target here was to determine the possibility of achieving the cold-flame-combustion-effect resulting with reduced NO_x emission and simultaneously getting any reduction of soot emission, using different injection strategy.

Taking into consideration the results of earlier performed tests by Volkswagen, 4 test points were suggested. The

Jednym z najbardziej pożądaných rozwiązań sterowania procesem spalania jest wykorzystanie np. spalania niskotemperaturowego w celu ograniczenia emisji tlenków azotu oraz cząstek stałych. Koncepcja ta bazuje na ograniczeniu temperatury spalania (prowadzącej do ograniczenia powstawania NO_x przez zastosowanie dużego udziału recyrkulowanych spalin) z jednoczesnym obniżeniu stopnia sprężania [3, 4]. Warunki takie zwiększają okres mieszania paliwa co jednocześnie wydłuża okres samozapłonu paliwa. Z tego powodu konieczne staje się wykorzystanie strategii podziału dawki paliwa, w celu jednoczesnego ograniczenia emisji węglowodorów i tlenku węgla.

Zastosowanie podziału dawki paliwa w systemie LTC [1] pozwoliło dodatkowo na ograniczenie emisji węglowodorów i tlenku węgla. W przypadku małych obciążeń uzyskano to dzięki skróceniu czasu przerwy między dawkami i ograniczeniu wielkości drugiej dawki (do wielkości 20%). Podczas średnich i dużych obciążeń uzyskano dodatkowo ograniczenie poziomu dźwięku generowanego przez proces spalania w wyniku wtrysku dwóch dawek, tak aby uzyskać spalanie dwustopniowe.

Obecne prace dotyczą również zastosowania układów dwupaliwowych: oleju napędowego, benzyny i etanolu [2], w których paliwa benzynowe wtryskiwano do kanału dolotowego przy znacznym udziale recyrkulowanych spalin. Niezależnie od mieszanin (benzyna-olej napędowy lub E85-olej napędowy) uzyskano jednakowy początek spalania, przy czym E85-olej napędowy spalano przy mniejszym udziale EGR i mniejszej porcji dawki paliwa wtryskiwanej do kolektora dolotowego. Mieszanina benzyna-olej napędowy pozwalała na uzyskanie spalania dwustopniowego, a spalanie mieszaniny E85-olej napędowy skutkowało dużym jednostopniowym wywiązywaniem ciepła.

2. Problem i metodyka badawcza

Badania przeprowadzono na jednocylindrowym silniku doświadczalnym w celu określenia wskaźników operacyjnych silnika pracującego dla różnych wartości recyrkulacji spalin w zakresie od 0% do 60% ilości ładunku w cylindrze. Głównym celem badań było określenie możliwości uzyskania efektu spalania niskotemperaturowego skutkującego zmniejszeniem emisji NO_x i jednoczesnego uzyskania zmniejszenia emisji sadzy (cząstek stałych) dzięki zastosowaniu zmienionej strategii wtrysku paliwa.

Uwzględniając wyniki wcześniejszych badań przeprowadzonych przez firmę Volkswagen, zaproponowano 4 punkty obciążenia silnika. Wynikają one z testu silnikowego NEDC. Wartości poszczególnych parametrów dla danych punktów pracy silnika są podane w tabelicy 1. Rozmieszczenie tych punktów pracy na charakterystyce ogólnej silnika pokazano na rys. 1.

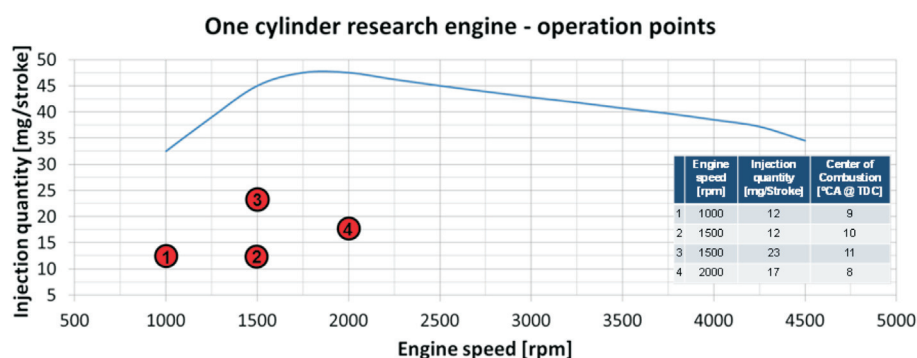


Fig. 1. Location of operating points on the engine operating map

Rys. 1. Położenie punktów pracy na mapie pracy silnika

points are relative to the NEDC test. Values of individual parameters for a given operation point are presented in Table 1. The location of operating points on the engine operating map is shown in Fig. 1.

In order to perform a cold-flame-combustion process in this investigation was used fuel whose parameters are shown in Table 2. In this study, was done a comparison of results obtained using, a fuel RF (EU5-CEC-Diesel Fuel) and F4 (75% Naphtha + 25% HVO). From the comparison shown in Fig. 2 it has been found that by applying of fuel F4 the substantial reduction of soot (PM) emission by high EGR-rates should be achieved against Reference Fuel (RF), Fig. 2, especially by higher EGR-rates. For F4 the level of NO_x emission was kept at similar values as for RF fuel, slightly better by lower EGR-rates. For high EGR-rates NO_x emission is getting much lower, what implicated effects of LTC.

Table 2. Specific features of the fuel used in research

Tabela 2. Specyfika paliwa wykorzystywanego w badaniach

Feature/ wielkość	Units/ jednostka	RF/wartości referencyjne	Results/ wyniki
Cetane Number/liczba cetanowa	CFR	54.4	51.1
Density@15 deg C/ gęstość	kg/m ³	835	740
Distillation IBP/destylacja	°C	—	96.3
Distillation FBP/destylacja	°C	362.7	290.3
Sulfur/siarka	mg/kg	< 10	< 3.0
Aromatics/aromatyczne	% v/v	3.0	0.0
Net heating value/wartość opałowa	MJ/kg	42.87	44.19

3. Methodology

In test-bed investigations of AVL research engine main measured values were: M_o (torque), G_e (fuel consumption) and n (engine speed). Based on these data some other indexes were calculated:

Indicated power:

$$P_i = \frac{V_{ss} \cdot IMEP \cdot n}{\tau}$$

Indicated specific fuel consumption:

$$b_i = \frac{G_e}{P_i}$$

Specific emission was calculated emission density, air density and air and fuel consumption:

Soot

$$\text{Soot} \left[\frac{\text{g}}{\text{kWh}} \right] = \frac{\text{Soot} \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right] \rho_{ex} (G_e + G_{air})}{P_i}$$

W celu uzyskania niskotemperaturowego procesu spalania w tych badaniach zastosowano paliwo, którego parametry przedstawiono w tablicy 2. W tych badaniach porównano wyniki otrzymane przy użyciu paliwa referencyjnego RF (EU5-CEC-olej napędowy) i paliwa F4 (75% nafta + 25% HVO). Na podstawie porównania przedstawionego na rys. 2 stwierdzono, że stosując paliwo F4 można uzyskać znaczne zmniejszenie emisji sadzy (cząstek stałych) w stosunku do zasilania olejem napędowym, szczególnie przy dużym stopniu recyrkulacji spalin. Dla paliwa F4 emisja NO_x utrzymywała się na takim samym poziomie, jak w przypadku zasilania olejem napędowym (RF) i była nieznacznie niższa przy mniejszych wartościach stopnia recyrkulacji spalin. Dla większego udziału spalin, emisja NO_x znacznie się obniża, co wskazuje na wystąpienie spalania niskotemperaturowego LTC.

3. Metodyka

W badaniach stanowiskowych na silniku AVL mierzono główne wskaźniki operacyjne: Mo (moment obrotowy), Be (sekundowe zużycie paliwa) i n (prędkość obrotowa silnika). Na podstawie tych wielkości obliczano pozostałe wskaźniki: moc indykowaną, indykowane jednostkowe zużycie paliwa.

Jednostkową emisję obliczano na podstawie gęstości emisji, gęstości powietrza oraz zużycia powietrza i paliwa dla sadzy, CO, HC, CO₂ i sprawności indykowanej.

Współczynnik kowariancji dla średniego ciśnienia użytecznego, COV(IMEP), jest powszechnie uznawaną zmienną do oceny powtarzalności spalania, i jest definiowany następująco:

$$\text{COV(IMEP)} = \frac{\sigma(\text{IMEP})}{\mu(\text{IMEP})}$$

gdzie: σ i μ oznaczają odpowiednio odchylenie standardowe i wartość średnią wynikającą z liczby następujących po sobie cykli spalania; w przeprowadzonych badaniach wykorzystano 20 lub 30 cykli spalania do wyznaczenia każdego uśrednienia.

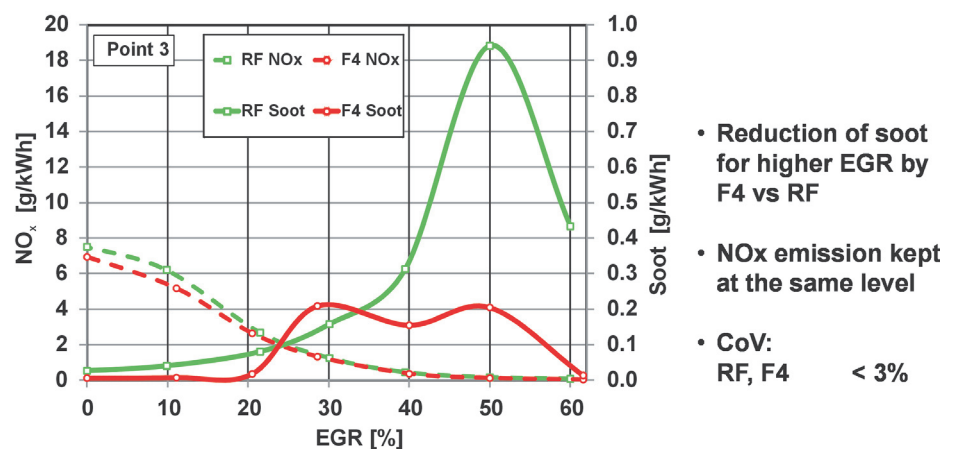


Fig. 2. Soot and NO_x emissions when using RF and F4 fuels vs EGR-rate

Rys. 2. Emisja sadzy i tlenków azotu przy użyciu paliwa RF i F4 z wykorzystaniem różnego udziału recyrkulacji spalin

- Reduction of soot for higher EGR by F4 vs RF
- NO_x emission kept at the same level
- CoV: RF, F4 < 3%

$$\begin{aligned} \text{CO} \quad \text{CO} \left[\frac{\text{g}}{\text{kWh}} \right] &= \frac{\text{CO} [\text{ppm}] - 0.000966 \cdot (G_e + G_{\text{air}})}{P_i} \\ \text{HC} \quad \text{HC} \left[\frac{\text{g}}{\text{kWh}} \right] &= \frac{\text{HC} [\text{ppm}] - 0.000479 \cdot (G_e + G_{\text{air}})}{P_i} \\ \text{CO}_2 \quad \text{CO}_2 \left[\frac{\text{g}}{\text{kWh}} \right] &= \frac{\text{CO}_2 [\text{ppm}] - 0.001519 \cdot (G_e + G_{\text{air}})}{P_i} \\ \eta_i \quad \eta_i &= \frac{1}{G_{\text{CV-bi}}} \end{aligned}$$

The coefficient of variation for the indicated mean effective pressure, COV(IMEP), is a commonly accepted variable for combustion stability, and is defined as:

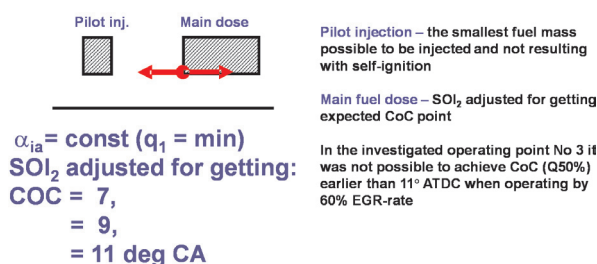
$$\text{COV(IMEP)} = \frac{\sigma(\text{IMEP})}{\mu(\text{IMEP})}$$

where: σ and μ are the standard deviation and the mean value, respectively, over a number of consecutive combustion cycles. In the performed experiments, 20 or 30 combustion cycles were used for calculating each estimate.

The investigations were performed for cooled external EGR. Investigations were carried out for various values of EGR-rate in the range from 0% up to 60-65% of EGR, depending on the possibility of reaching stable operating conditions of engine. In order to optimize the combustion process, in terms of thermodynamic indexes and the emission of toxic compounds, the following tests were carried out, the results of which will be presented in subsequent chapters:

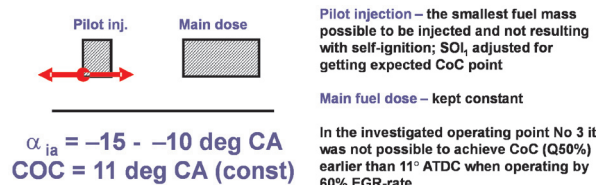
1. Single fuel dose – optimization of COV for F4, by changing SOI
Optimization of CoC changes in range of ca. 6.5 to ca. 13° ATDC.
2. Divided fuel dose, F4 injection strategy 1 vs. RF single fuel dose

Injection strategy 1



3. Divided fuel dose, PF 6 injection strategy 2

Injection strategy 2



4. Test bed and measuring apparatus

The main research goals for investigations on a 1-cyl. research engine were:

Badania prowadzono wykorzystując zewnętrzną, chłodzoną recyrkulację spalin. Pomiary wykonywano dla różnych wartości stopnia recyrkulacji (EGR) w zakresie od 0% do 60-65%, w zależności od możliwości uzyskania stabilnych warunków pracy silnika. W celu optymalizacji procesu spalania pod względem wskaźników termodynamicznych i emisji związków toksycznych, przeprowadzono kolejne testy, których wyniki zaprezentowano w kolejnych rozdziałach:

1. Pojedyncza dawka paliwa – optymalizacja równomierności pracy silnika (COV) dla paliwa F4 przez zmiany chwili początku spalania (SOI).
Optymalizacja zmian centum spalania CoC (*Centre of Combustion*) w zakresie od ok. 6,5 do ok. 13° po GMP.
2. Dzielona dawka paliwa, paliwo F4, strategia wtrysku nr 1 w stosunku do pojedynczej dawki wtryskowej i paliwa RF (olej napędowy).
3. Divided fuel dose, F4, injection strategy 2.
Dzielona dawka paliwa, paliwo F4, strategia wtrysku 2.

4. Stanowisko badawcze i aparatura pomiarowa

Główne cele podjętych badań były następujące:

1. Przeprowadzenie w rzeczywistym silniku spalinowym weryfikacji wpływu strategii wtrysku różnych paliw na wybrane wskaźniki fizyczne, termodynamiczne i chemiczne;
2. Stwierdzenie wpływu stopnia recyrkulacji spalin na analizowane wskaźniki procesu spalania;
3. Wyjaśnienie, czy paliwo F4 umożliwia spalania niskotemperaturowe.

Aby wymienione celu można było osiągnąć należało przystosować silnik do wymaganych pomiarów i wyposażać stanowisko badawcze w odpowiedni a aparaturę kontrolno-pomiarową. Dostosowanie silnika do wymaganego stopnia sprężania 16,2:1 wymagało odpowiedniego doboru uszczelki podgłowicowej (rys. 3). Do dalszych badań wybrano uszczelkę o wysokości 2,5 mm, która umożliwiła uzyskanie odpowiedniego ciśnienia ładunku pod koniec suwu sprężania (36-37 bar, bez doładowania). Wymieniono także tłok w celu dostosowania komory spalania do zastosowanego wtryskiwacza (rys. 4). Dla badań na silniku AVL Konieczna była

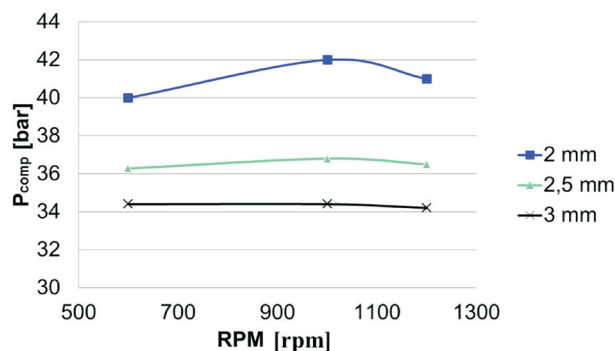


Fig. 3. Compression pressure for different cylinder gaskets, no supercharging

Rys. 3. Ciśnienie sprężania dla różnych grubości uszczelki pod głowicą, silnik niedoładowany

1. Verification on the real engine of the influence of the injection strategy on the selected physical, thermodynamic and chemical indexes, for different fuels.
2. Statement of the influence of the EGR-rate on the analyzed indexes of the combustion process.
3. An explanation of whether a fuel F4 will allow low-temperature combustion.

To achieve the above goals it was necessary to adjust the engine to the foreseen tests and outfit with appropriate control-measuring equipment. The accommodation of engine compression ratio to the required value of 16.2:1 by the change of gasket was done firstly (see Fig. 3). The piston was also changed in order to fit the combustion chamber to the applied injector (see Fig. 4).

2.5 mm cylinder gasket which provided expected level of charge pressure at the end of compression course (36–37 bar, without supercharging) has been chosen for further investigation.

For the investigations on AVL research engine a adaptation of piston bowl was necessary to achieve result closer to the original combustion chamber in Volkswagen research engine.

According to the proposed measuring points (see Tab. 1) the engine was equipped with a Bosch CR system 4th generation that allows injection under the pressure exceeding 200 MPa (Fig. 5). A compressor supercharging system was applied as well.

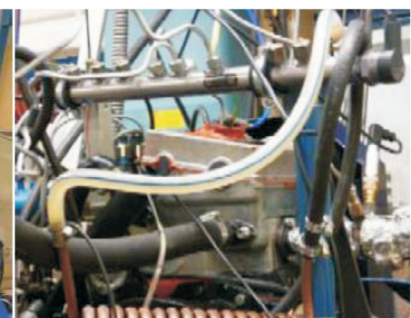
The planned tests required new design of the EGR system. The one used is of the external-type, high pressure EGR with



Fig. 4. New piston in AVL 5804 engine

Rys. 4. Nowy tłok w silniku AVL 5804

adaptacja kształtu komory spalania w tłoku, żeby uzyskiwać wyniki najbardziej zbliżone do oryginalnej komory spalania w badawczym silniku Volkswagena.



AVL 5804 Research engine

- 1-Cylinder, $V_h=510 \text{ cm}^3$, CI, 4 V OHC, CR direct injection (Bosch CP 4),
- supercharged / naturally aspirated



Fuel is being cooled after measuring device – fuel temperature stabilization

Common rail

CP4 from CI DI 3.0 dm³ engine pump

Injector pressure sensor



Fig. 5. Test stand: AVL 5804 engine, fuel system: Bosch CP4 pump, mechanical driven supercharging
Rys. 5. Stanowisko badawcze: silnik AVL 5804, układ paliwowy: pompa Bosch CP4, doładowanie mechaniczne

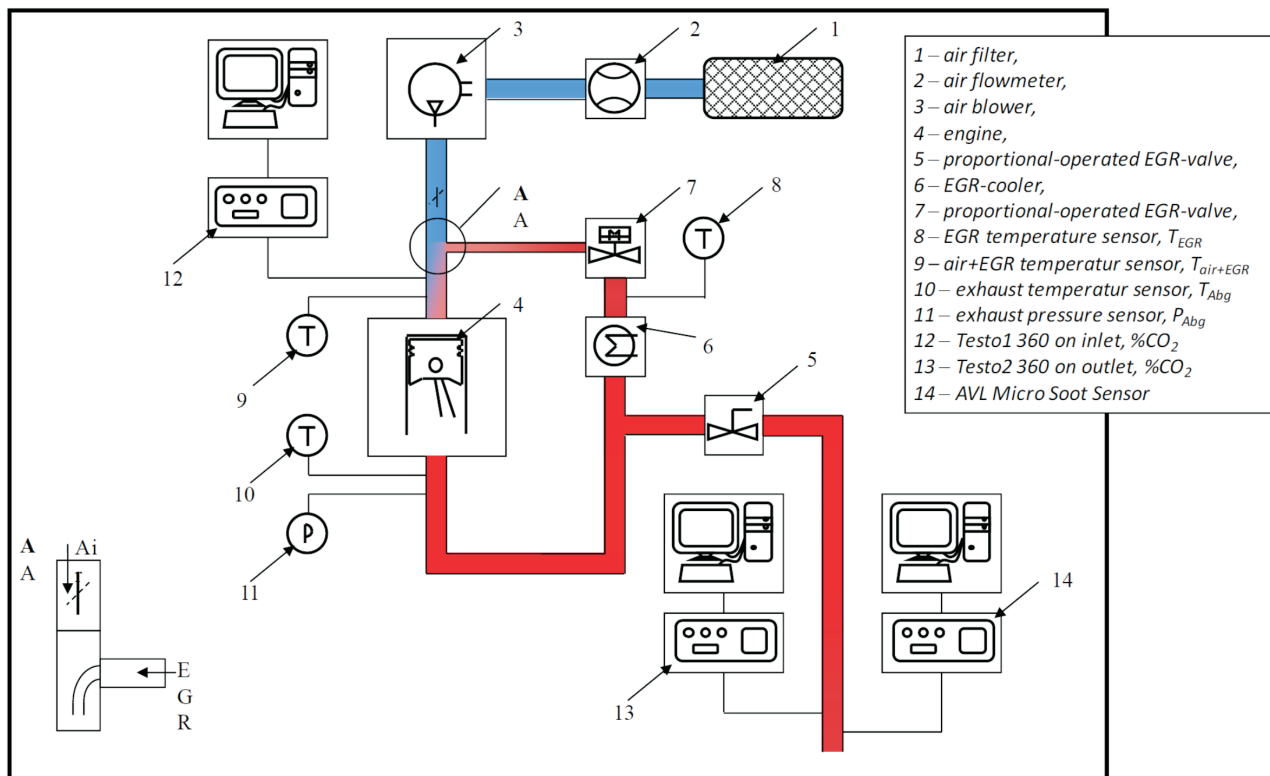


Fig. 6. EGR system

Rys. 6. System recyrkulacji spalin

exhaust cooling (Fig. 6). For proper interpretation of the influence of EGR-rate on engine operational indexes following measuring data had to be controlled and recorded: mass of inlet air, temperature and pressure of inlet air, charging pressure, temperature of EGR, temperature of exhaust-air mixture measured before intake valve, CO₂-rate at inlet (in percent), temperature of exhaust gases after the exhaust

Zgodnie z proponowanymi punktami badawczymi (por. tabl. 1) silnik był wyposażony w system wtryskowy Bosch CR 4-tej generacji, który umożliwia wtrysk pod ciśnieniem 200 MPa (rys. 5). Został także zastosowany system mechanicznego doładowania sprężarkowego.

Podejmowane badania wymagały zastosowania nowej konstrukcji system recyrkulacji spalin. Zastosowano system

typu recyrkulacji zewnętrznej, wysokociśnieniowy z chłodzeniem spalin (rys. 6). Dla właściwej oceny wpływu stopnia recyrkulacji spalin na wskaźniki operacyjne silnika sterowaniu i pomiarom poddano następujące wielkości: masa powietrza dolotowego, temperatura i ciśnienie powietrza dolotowego, ciśnienie doładowania, temperatura recyrkulowanych spalin, temperatura mieszaniny spaliny-powietrze przed zaworem dolotowym, zawartość CO₂ w powietrzu dolotowym (w %), temperatura spalin za zaworem wylotowym, ciśnienie wydechu, zawartość składników toksycznych w spalinach jak: CO₂, CO, HC, PM, NO_x, O₂ i wartość współczynnika nadmiaru powietrza były także mierzone w gazach spalinowych. Do określenia stopnia recyrkulacji wykorzystywano urządzenie Testo 360 (rys. 7). Do pomiaru pozostałych składników toksycznych CO₂ [%], CO [ppm], HC [pm], NO_x [ppm] zastosowano urządzenie Horiba Mexa 7100D

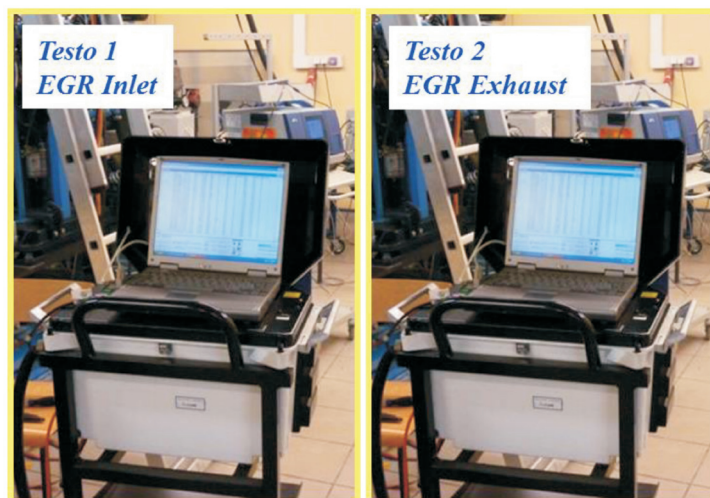


Fig. 7. Measured CO₂ at inlet and exhaust to determine the EGR-rate using Testo 360

Rys. 7. Pomiar CO₂ w kanale dolotowym i wylotowym w celu określenia stopnia recyrkulacji spalin z wykorzystaniem Testo 360

valve, exhaust pressure, content of toxic compounds like CO_2 , CO , HC , PM , NO_x , O_2 and lambda value were measured at the engine exhaust as well. To determine the AGR-rate was used Testo 360 (Fig. 7).

To measure toxic compounds like CO_2 [%], CO [ppm], HC [ppm], NO_x [ppm] was used Horiba Mexa 7100D (Fig. 8) and for PM – AVL MSS (Fig. 8).

5. Results and discussions

5.1. Single fuel dose – optimization of COV for F4, by changing SOI

In investigations conducted on engine operating with higher EGR-rates the worse operating stability resulted with higher CoV-values of IMEP has been observed. Next series of measurements has been undertaken then to check the possibilities for bettering this situation by advancing or delaying of SOI for keeping expected value of CoC (Centre of Combustion, heat released 50%) predefined for 11° ATDC. The research results achieved for CoC changes in range of ca. 6.5 to ca. 13° ATDC and its influence on energetic indexes of the engine are shown in Figure 9.

From results in Figure 9 it could be observed that lowering of CoC (advancing SOI) most energetic indexes are getting higher for lower EGR-rates. For EGR-rate 60% CoC value achieves his optimal value by ca. $9-10^\circ$ ATDC.

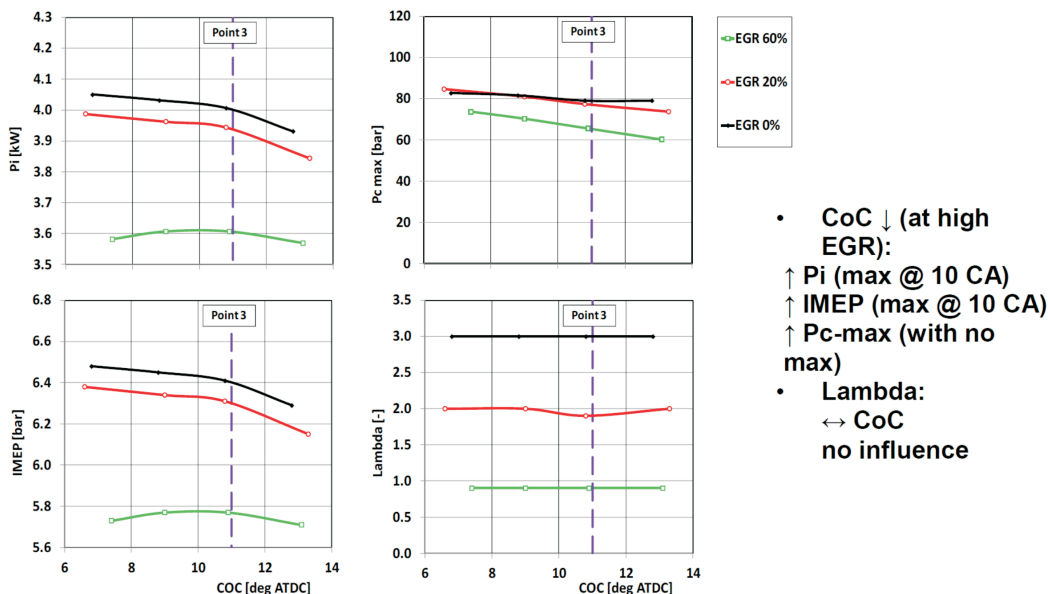


Fig. 9. Some selected energetic indexes of the engine plotted vs. CoC [deg. ATDC] for fuel F4 and various EGR-rates: 0, 20, 60%

Rys. 9. Wybrane wskaźniki energetyczne określone względem CoC [st. po GMP] dla paliwa F4 przy różnym udziale EGR: 0, 20, 60%



Fig. 8. Measured toxic compounds using Horiba Mexa 7100D and AVL MSS

Rys. 8. Pomiar emisji składników szkodliwych spalin z wykorzystaniem Horiba MEXA 7100D i AVL MSS

(rys. 8a) a do pomiarów cząstek stałych (PM) – urządzenie AVL MSS (Fig. 8b).

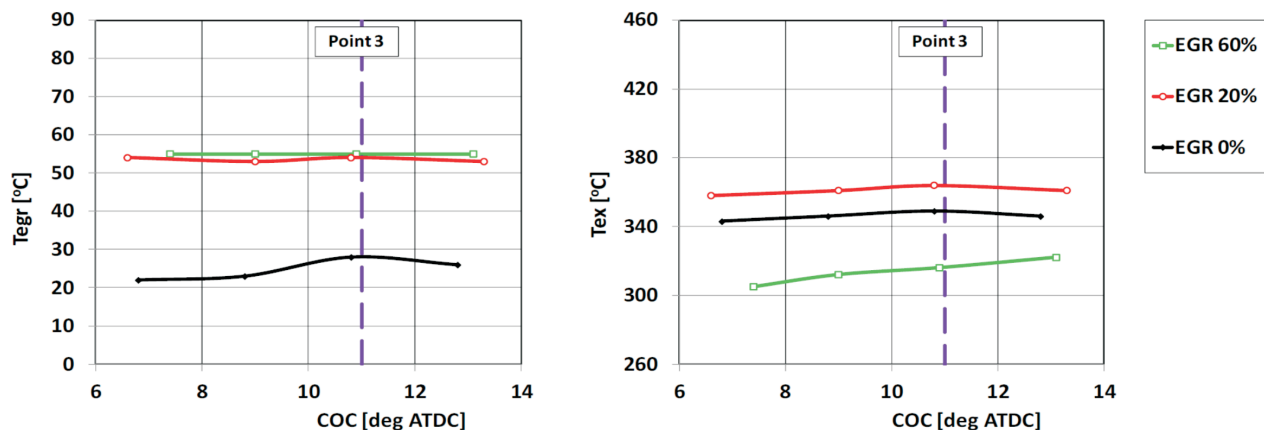
5. Wyniki i ich interpretacja

5.1. Pojedyncza dawka paliwa – optymalizacja powtarzalności spalania dla paliwa F4 przez zmianę początku wtrysku

W badaniach prowadzonych na silniku pracującym z dużymi wartościami stopnia recyrkulacji spalin obserwowano najgorszą równomierność pracy wynikającą z dużych wartości kowariancji średniego ciśnienia indykowanego. Kolejne serie badawcze podjęto w celu sprawdzenia możliwości

poprawy tej sytuacji przez przyspieszenie lub opóźnienie kąta początku wtrysku utrzymując przy tym oczekiwane wartości CoC (środek spalania, wywiązanie 50% ciepła) wstępnie ustalone na 11° po GMP. Wyniki uzyskane dla zmiany kąta środka spalania CoC w zakresie ok. $6,5$ do ok. 13° po GMP i jej wpływ na wskaźniki energetyczne silnika przedstawiono na rys. 9.

Z wyników przedstawionych na rys. 9 można



- LTC (for all CoC variants) → for EGR 60% T_{exh} lower than for 0% EGR
- by 30-40°C: CoC ↓ : T_{exh} ↓

Fig. 10. Exhaust and EGR temperature vs. CoC [deg. ATDC] for fuel F4 and for various EGR-rates: 0, 20, 60%

Rys. 10. Temperatura spalin oraz temperatura EGR określone względem CoC [st. po GMP] dla paliwa F4 przy różnym udziale EGR: 0, 20, 60%

When observing the influence of EGR-rates on thermodynamic indexes (see Figure 10) it could be stated, that for all CoC values T_{exh} is getting lower with higher EGR-rates (except 20%).

It was already mentioned, that advancing or delaying of SOI has its influence on the stability of engine operating which could be measured in form of covariance of IMEP (CoV-IMEP), Fig 11.

From this results it could be stated that worse engine operating stability occurs by advanced injection at middle EGR-

wynioskować, że przyspieszając wystąpienie środka spalania (CoC) przez przyspieszenie początku wtrysku paliwa większość wskaźników energetycznych ulega zwiększeniu dla małych wartości stopnia recyrkulacji spalin. Dla stopnia recyrkulacji 60% kąt wystąpienia środka spalania osiąga swoją wartość optymalną przy ok. 9-10° po GMP.

Z oceny wpływu stopnia recyrkulacji spalin na wskaźniki termodynamiczne cyklu silnikowego (por. rys. 10) wynika, że dla wszystkich przypadków zmiany środka spalania CoC

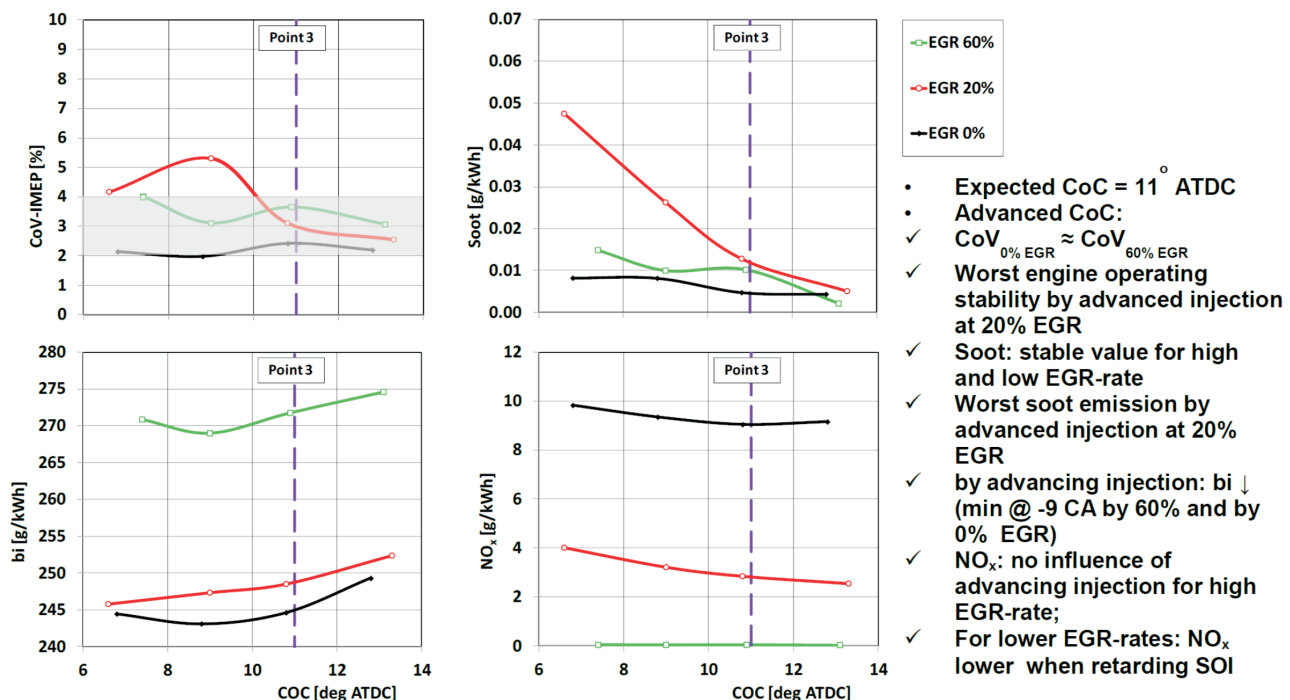


Fig. 11. Some selected ecological indexes of the engine plotted vs. CoC [deg. ATDC] for fuel F4 and various EGR-rates: 0, 20, 60%

Rys. 11. Wybrane wskaźniki ekologiczności określone względem CoC [st. po GMP] dla paliwa F4 przy różnym udziale EGR: 0, 20, 60%

rate 20%. By retarding of injection (CoC by 11–13° ATDC) stability of engine operating is acceptable, even for higher EGR-rates. In cases of retarding of injection specific fuel consumption is getting higher. However then specific emissions of soot and NO_x are getting lower at the same time.

5.2. Divided fuel dose, F4 injection strategy 1 vs. RF single fuel dose

When searching for optimal operating condition for the engine fed with fuel F4 a multi-injection has been examined. At the beginning the injection strategy No. 1 has been chosen: it is one pilot injection and main injection with adjustable SOI2 of the main dose. SOI1 of pilot dose was kept constant for all investigations in this series.

The results for this series of investigations are shown in Figure 12. It should be noted, that in the investigated operating point No. 3 it was not possible to achieve CoC (Q50%) earlier than 11° ATDC when operating by 60% EGR-rate.

The influence of injection strategy on emission of selected toxic compound has been examined as well. The results of it is shown in Fig. 13. It was stated, that when operating by 60% EGR-rate emissions of HC and CO are getting high, CO_2 is getting low and indicated efficiency η_{ci} is getting low – these results suggest poor combustion conditions.

temperatura spalin zmniejsza się wraz ze wzrastającym stopniem EGR (z wyjątkiem EGR = 20%).

Jak stwierdzono wcześniej, wyprzedzanie lub opóźnianie kąta początku wtrysku ma swój wpływ na równomierność pracy silnika, która może być mierzona współczynnikiem kowariancji średniego ciśnienia indykowanego (COV-IMEP), rys. 11.

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że gorsza równomierność pracy silnika pojawia się przy wyprzedzonym wtrysku dla średnich wartości stopnia recyrkulacji spalin 20%. Opóźniając wtrysk paliwa (zachowując jednak CoC przy 11–13° po GMP) równomierność pracy silnika jest akceptowalna, nawet dla dużych wartości stopnia recyrkulacji spalin. W przypadku opóźnienia wtrysku wzrasta jednostkowe zużycie paliwa. Jednakże w tych samych warunkach zmniejsza się jednostkowa emisja sadzy (PM) oraz NO_x .

5.2. Dzielona dawka paliwa F4, strategia wtrysku nr 1 w stosunku do pojedynczej dawki oleju napędowego

W celu określenia optymalnych warunków pracy silnika zasilanego paliwem F4 przebadano zasilanie wtryskiem wieloczęściowym. Na początek wybrano strategię wtrysku

nr 1: polega ona na wtrysku jednej dawki pilotującej i dawki głównej ze zmiennym kątem początku jej wtrysku SOI2. Kąt początku wtrysku dawki pilotującej utrzymywano stały dla wszystkich pomiarów w tej serii badawczej.

Wyniki tej serii badawczej pokazano na rys. 12. Można na nim zauważyć, że w badanym punkcie pracy silnika nr 3, przy pracy silnika ze stopniem recyrkulacji 60%, nie można było uzyskać środka spalania (CoC, $Q = 50\%$) wcześniej niż przy kącie 11° po GMP.

Wpływ strategii wtrysku paliwa na emisję wybranych toksycznych składników spalin także poddano badaniom. Ich wyniki przedstawiono na rys. 13. Stwierdzono, że przy pracy silnika z recyrkulacją 60% wzrasta emisja HC i CO, podczas gdy zmniejszają się

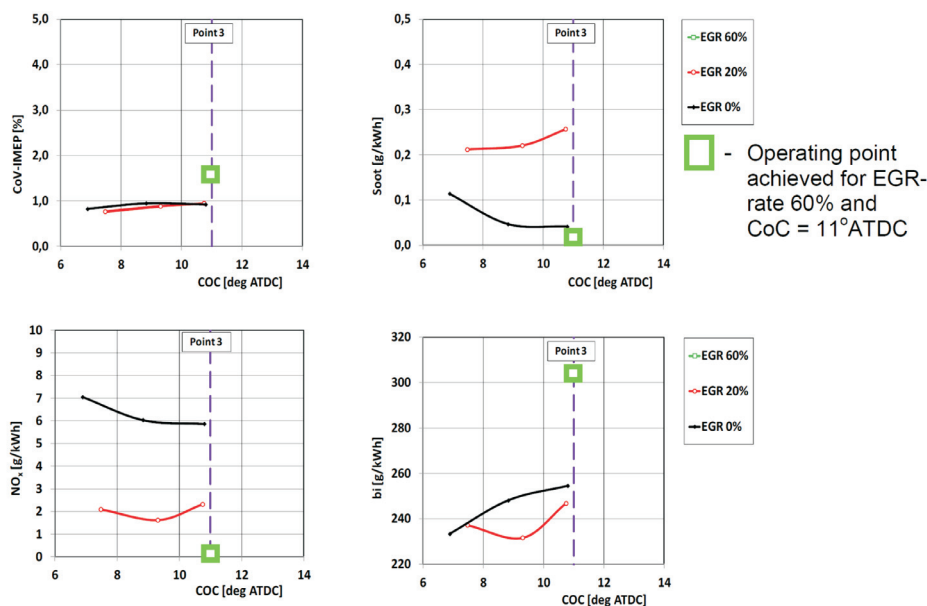


Fig. 12. Injection strategy 1: influence on CoV-IMEP (a), Soot (b), b_1 (c), NO_x (d) for different CoC by various EGR-rates; engine operating point 3

Rys. 12. Strategia wtrysku 1: wpływ na CoV-IMEP (a), cząstki stałe (b), b_1 (c), NO_x (d) dla różnych wartości CoC przy zmiennym udziale EGR; 3 punkt pracy silnika

Further, for the variation of CoC changes of energetic indexes of the engine have been examined. The achieved results are shown comparatively in Fig. 14. From this analysis it was concluded, that when operating by 60% EGR-rate P_i and IMEP low, $P_{\text{c-max}}$ are getting slightly lower, what indicates poor combustion conditions.

wówczas emisja CO_2 oraz sprawność indykowana procesu – te wyniki wskazują na złe warunki spalania.

Następnie określono także wpływ zmian położenia środka spalania CoC na wskaźniki energetyczne silnika. Otrzymane wyniki pokazano na rys. 14. Na podstawie ich analizy stwierdzono, że podczas pracy silnika z recyrkulacją 60% moc indykowana silnika i jego średnie ciśnienie indykowane są małe, ciśnienie maksymalne w cylindrze $P_{\text{c-max}}$

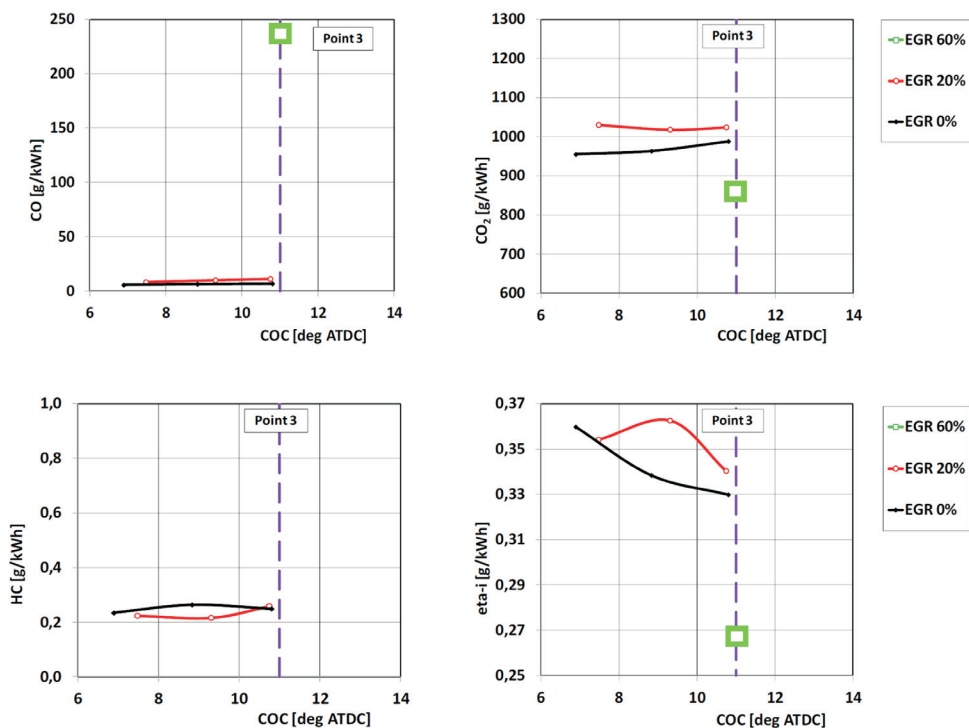


Fig. 13. Injection strategy 1: influence on CO (a), CO₂ (b), HC (c), eta-i (d) for different CoC by various EGR-rates; engine operating point 3

Rys. 13. Strategia wtrysku 1: wpływ na CO (a), CO₂ (b), HC (c), eta-i (d) dla różnych wartości CoC przy zmieniającym udziale EGR; 3 punkt pracy silnika

From the analysis of exhaust and EGR temperatures it has been noticed, that when operating by 60% EGR-rate these temperatures are lower than in other cases, but still high enough for aftertreatment system.

5.3. Divided fuel dose, F4 injection strategy 2

For the next stage of research another injection strategy has been selected, namely strategy 2 which was defined in chapter 2. In this case the start of pilot injection (SOI1) has been varied while main dose location (SOI2) remained constant.

As in the research in point 4.2 the measurements were performed for detection of instability of engine operating (CoV – covariance of IMEP), NO_x and Soot emissions, specific fuel consumption b_p , Fig. 15.

There are some conclusions achieved from this series of experiments. It was noted that for injection strategy 2 CoV-IMEP was bigger as for strategy 1, but accept-

zniejsza się nieznacznie, co wskazuje na niedobre warunki spalania.

Na podstawie analizy temperatury spalin oraz temperatury recykulowanych spalin stwierdzono, że przy pracy silnika z recykulacją 60% te temperatury są mniejsze niż w innych przypadkach, jednak wystarczająco wysokie dla system oczyszczania spalin.

5.3. Dzielona dawka paliwa F4, strategia wtrysku nr 2

W kolejnym etapie badań zastosowano inną strategię wtrysku paliwa, mianowicie strategię nr 2, która została zdefiniowana w rozdz. 2. W tym przypadku zmieniany był początek wtrysku dawki pilotującej (SOI1), natomiast chwila wtrysku dawki głównej pozostawała niezmienna.

Tak jak w badaniach z rozdziału 5.2, pomiary prowadzono w celu wykrycia niestabilności pracy silnika (COV – kowariancja średniego ciśnienia indykowanego) oraz stwierdzenia emisji NO_x i sadzy, jednostkowego zużycia paliwa b_p , rys. 15.

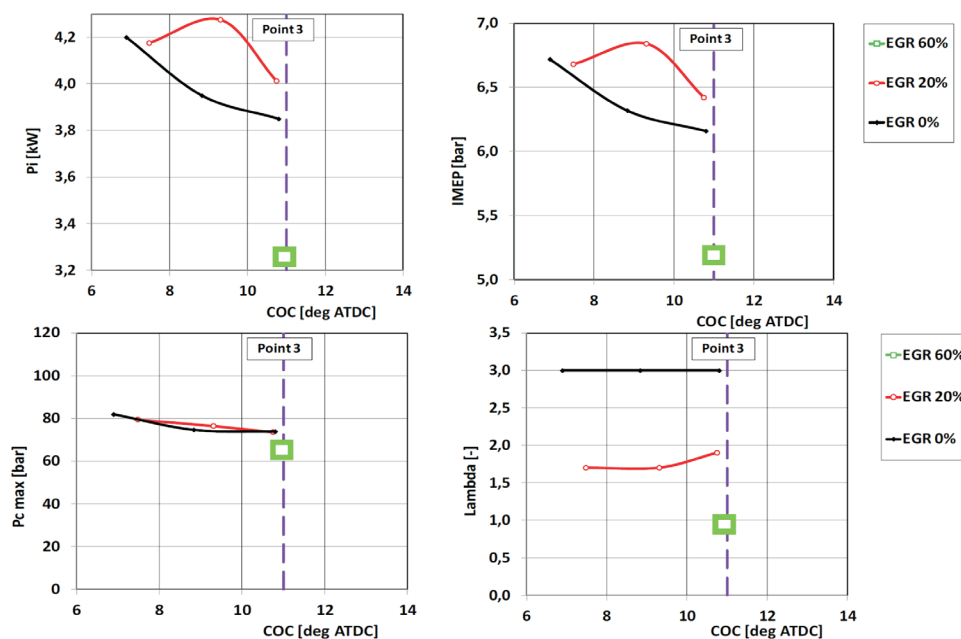


Fig. 14. Injection strategy 1: influence on P_i (a), P_{c-max} (b), IMEP (c), lambda (d) for different CoC by various EGR-rates; engine operating point 3

Rys. 14. Strategia wtrysku 1: wpływ na P_i (a), P_{c-max} (b), IMEP (c), lambda (d) dla różnych wartości CoC przy zmieniającym udziale EGR; 3 punkt pracy silnika

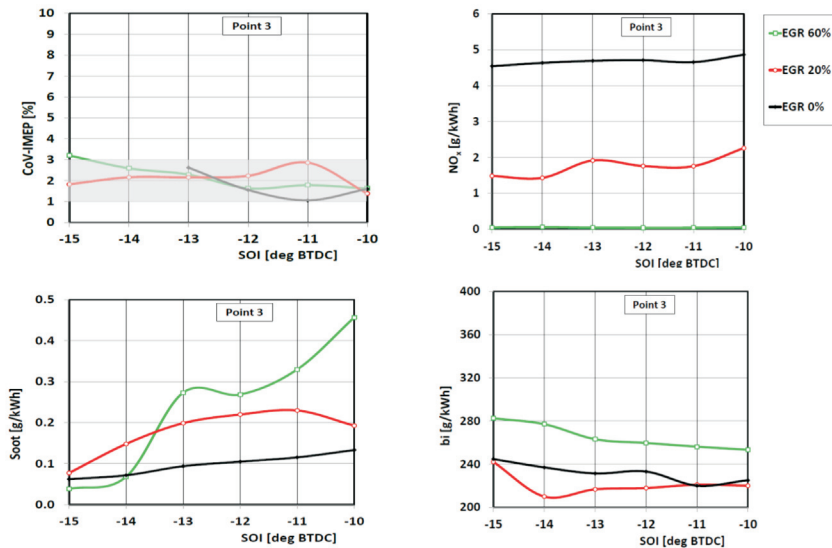


Fig. 15. Injection strategy 2: influence on CoV-IMEP (a), NO_x (b), Soot (c), b_i (d), for different CoC by various EGR-rates; engine operating point 3

Rys.15. Strategia wtrysku 2: wpływ na CoV-IMEP (a), cząstka stała (b), b_i (c), NO_x (d) dla różnych wartości CoC przy zmiennym udziale EGR; 3 punkt pracy silnika

able for all cases. The NO_x emission was observed slightly better as for strategy 1. In this case the Soot emission getting was getting higher when SOI retarded – this tendency was stronger for higher EGR-rates. It was also observed that the indicated fuel consumption was getting lower for retarding SOI: lower values for small and medium EGR-rates have been achieved.

Another comparison has been done for CO , CO_2 , HC emissions and for indicated efficiency η_{ci} , Figure 16. In this case it was concluded, that CO emission occurred biggest for EGR 60%, but better as for strategy 1. In this case big CO emission resulted in lower CO_2 emission. The highest HC emission was observed for EGR 60% and for $\text{SOI} = -13 \dots -10^\circ$ BTDC. It was also noted that for biggest EGR-rate the η_{ci} value are getting-up by retarding SOI.

In the same conditions the comparison of P_i , IMEP, $P_{\text{c-max}}$, λ has been performed. The achieved results are shown in Fig. 17. On their basis it could be concluded that for EGR 60% the highest values of P_i and IMEP could be achieved by retarding SOI; the tendency in $P_{\text{c-max}}$ changes are almost the same.

From the analysis of exhaust and EGR temperatures it was concluded, that when operating by 60% EGR-rate T_{exh} was much lower than in other cases, but still enough high for aftertreatment system. The T_{exh} achieved by application of strategy

Z tej serii badań uzyskano następujące wnioski. Stwierdzono, że dla strategii wtrysku 2 kowariancja średniego ciśnienia indykowanego (COV – IMEP) była większa niż dla strategii nr 1, ale jednocześnie była zadowalająca we wszystkich przypadkach. W przypadku strategii 1 stwierdzono nieznacznie mniejszą emisję NO_x . W tym jednak przypadku emisja sadzy wzrastała, gdy opóźniano początek wtrysku paliwa – tendencja ta okazała się silniejsza przy większych wartościach recyrkulacji spalin. Zaobserwowano także zmniejszanie jednostkowego zużycia paliwa przy opóźnianiu początku wtrysku paliwa; przy tym uzyskiwano mniejsze wartości dla małych i średnich wartości recyrkulacji spalin.

Kolejne porównanie zostało przeprowadzone dla emisji CO , CO_2 i HC oraz dla sprawności indykowanej,

rys. 16. W tym przypadku stwierdzono, że emisja CO okazuje się największa dla recyrkulacji 60%, jednak mniejsza niż w przypadku strategii 1. W tym przypadku duża emisja CO wynikała z małej emisji CO_2 . Największą emisję HC obserwowano dla recyrkulacji 60% oraz kąta wyprzedzenia wtrysku $\text{SOI} = -13 \dots -10^\circ$ przed GMP. Zauważono także, że dla dużych wartości recyrkulacji wartość sprawności indykowanej rośnie przy opóźnianiu początku wtrysku.

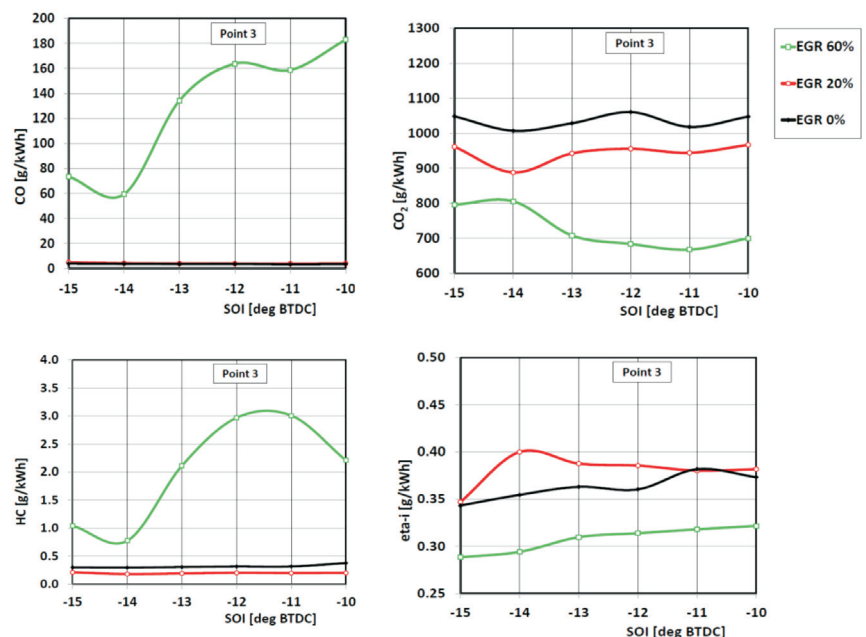


Fig. 16. Injection strategy 1: influence on CO (a), CO_2 (b), HC (c), η_{ci} (d) for different CoC by various EGR-rates; engine operating point 3

Rys.16. Strategia wtrysku 1: wpływ na CO (a), CO_2 (b), HC (c), η_{ci} (d) dla różnych wartości CoC przy zmiennym udziale EGR; 3 punkt pracy silnika

2 was higher than by strategy 1.

Similarly to investigations performed for strategy 1, the analysis of indicated parameters of the engine has been evaluated as well. From the data achieved by indicating of engine cylinder pressure some other parameters and indexes could be determined. There were: cylinder pressure P_{cyl} , heat released Q , cylinder pressure rate $dP/d\alpha$, heat released rate $dQ/d\alpha$. The achieved results are presented in Fig. 18.

From the results shown here it could be stated, that with lightly bigger EGR-rate (here 20%) the combustion process is getting faster (faster $dP/d\alpha$ and $dQ/d\alpha$) and for highest EGR-rate (here 60%) this process is getting much slower. In this last case some compensation of this effect could be achieved by advancing of SOI.

Further investigations of cylinder pressure history have led to the conclusion, that cylinder pressure traces could be influenced much by adjustment of SOI, as it is presented in Fig. 19.

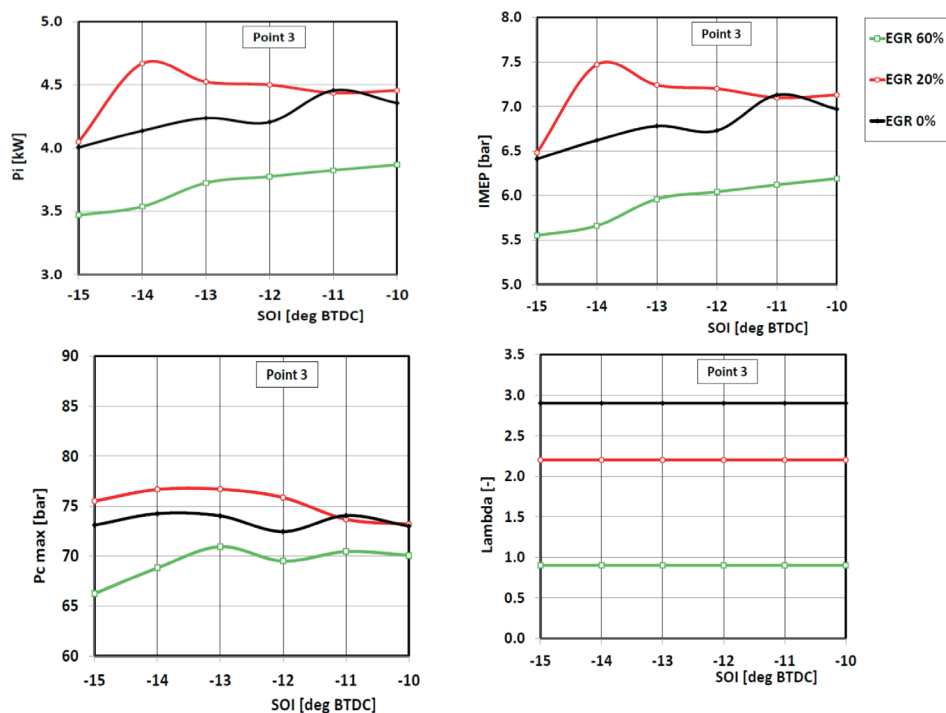


Fig. 17. Injection strategy 2: influence on P_i (a), P_{c-max} (b), IMEP (c), lambda (d) for different CoC by various EGR-rates; engine operating point 3

Rys. 17. Strategia wtrysku 2: wpływ na P_i (a), P_{c-max} (b), IMEP (c), lambda (d) dla różnych wartości CoC przy zmieniającym udziale EGR; 3 punkt pracy silnika

W tych samych warunkach przeprowadzono porównanie mocy indykowanej P_i , średniego ciśnienia indykowanego IMEP, maksymalnego ciśnienia w cylindrze P_{c-max} i współczynnika nadmiaru powietrza λ . Uzyskane wyniki pokazano na rys. 17. Na ich podstawie stwierdzono, że recykulacji spalin 60% można uzyskać największe wartości P_i i IMEP przez opóźnienie początku wtrysku paliwa; podobną tendencję wykazuje P_{c-max} .

Z analizy temperatury spalin i spalin recykulowanych wywnioskowano, że przy pracy silnika z recykulacją spalin 60% temperatura spalin była dużo niższa niż w innych przypadkach, ale jednocześnie wystarczająco duża dla pracy systemu oczyszczania spalin. Temperatura spalin otrzymana przez zastosowanie strategii wtrysku nr 2 była wyższa niż przy zastosowaniu strategii nr 1.

Podobnie jak dla badań przeprowadzonych dla strategii wtrysku nr 1, także w tym przypadku przeprowadzono indykowanie parametrów pracy silnika. Z danych uzyskanych przez indykowanie ciśnienia w cylindrze silnika można było wyznaczyć także inne wskaźniki. Były to: ciśnienie cylindra P_{cyl} , wywiązywanie ciepła Q , szybkość narastania ciśnienia $dP/d\alpha$.

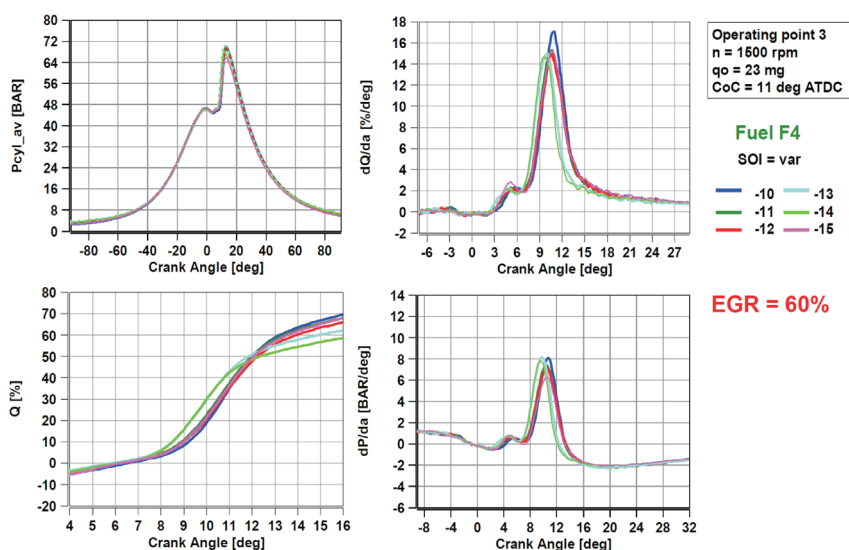


Fig. 18. Selected cylinder indexes history resulted from engine indicating; comparison for various EGR-rates from 0% up-to 60% when applying injection strategy 2

Rys. 18. Wybrane wskaźniki pracy silnika określone na podstawie indykowania cylindra; porównanie różnych udziałów EGR od 0% aż do 60%, przy zastosowaniu strategii wtryskowej 2

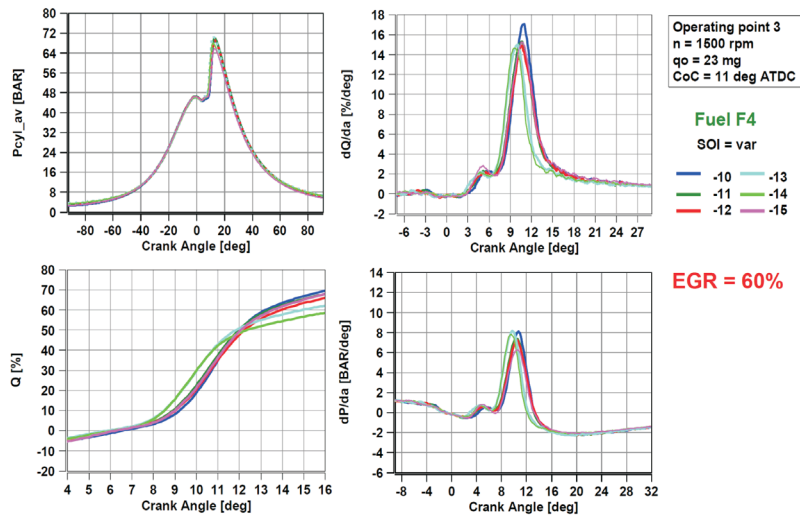


Fig. 19. Comparison of cylinder pressure traces for fuel F4 (PF 6), high EGR-rate 60%, CoC = 11° ATDC = constant and various SOI: -11...-15° BTDC; results achieved in operating point 3: n = 1500 rpm, $q_0 = 23$ mg

Rys. 19. Porównanie przebiegów ciśnienia w cylindrze dla paliwa F4 (PF6), dla dużego udziału EGR 60%, stałe CoC = 11° po GMP i różnego SOI: -11 ...-15° przed GMP; wyniki uzyskane w 3 punkcie pracy silnika: $n = 1500$ obr/min; $q_0 = 23$ mg

6. Summary and conclusions (which multi-injection strategies are better in respect of in-cylinder heat release and exhaust emissions)

For reducing of NO_x emission from operating engine realization of combustion process by lower flame temperatures seems to be necessary. Such investigations have been undertaken for research engine operating on F4 fuel. The influences of EGR-rate, CoC, SOI and injection strategy (No. 1 vs. No. 2) have been examined. The achieved results are shown in the figure 20. Based on research found the following conclusions:

1. When fueling with F4 NO_x emission slightly lower for small EGR-rates, for high EGR – very low.
2. Fueling with F4 NO_x emission lower for CoC = 11–12° ATDC; lower when operating with higher EGR-rates.
3. For F4 injection strategy 1 das not allow to operate with late SOI (CoC > 11° ATDC); possible only for EGR = 60% – than the lowest NO_x emission was achieved.
4. For F4 injection strategy 2 allows to operate with various SOI; the lowest NO_x emission was achieved for highest EGR-rate.

In this circumstances it has been examined if with the same methods it would be possible to reduce the emission of Soot (or PM – particles) (Fig. 21), some conclusions are:

1. When fueling with F4 Soot emission slightly lower for small EGR-rates, for

$d\alpha$, szybkość wywiązywania ciepła $dQ/d\alpha$.

Na podstawie pokazanych tutaj wyników stwierdzono, że przy nieznacznie zwiększonym stopniu recyrkulacji spalin (tutaj 20%) proces spalania ulega przyspieszeniu (większe wartości $dP/d\alpha$ i $dQ/d\alpha$), a dla większych wartości recyrkulacji (tutaj 60%) ten proces ulega znacznemu spowolnieniu. W tej ostatniej sytuacji spadek ten może być skompensowany przez wyprzedzenie kata początku wtrysku.

Dalsze badania przebiegu ciśnienia w cylindrze doprowadziły do wniosku, że przebiegi ciśnienia w cylindrze mogą być w znacznym stopniu kształtowane przez dobór kąta początku wtrysku, jak pokazano na rys. 19.

6. Podsumowanie i wnioski

Dla obniżenia emisji NO_x z pracującego silnika wydaje się konieczne prowadzenie procesu spalania przy obniżonej temperaturze płomienia. Takie badania podjęto w silniku badawczym zasilanym paliwem F4. W badaniach oceniano wpływ stopnia recyrkulacji spalin, położenia środka spalania CoC, kata początku wtrysku oraz strategii wtrysku (porównując strategię nr 1 w stosunku do strategii nr 2). Uzyskane wyniki pokazano na rys. 20. Na podstawie tych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Przy zasilaniu paliwem F4 emisja NO_x jest nieznacznie mniejsza dla małych wartości stopnia recyrkulacji spalin,

LTC @ 60% EGR; Task: Low NO_x Emission for F4

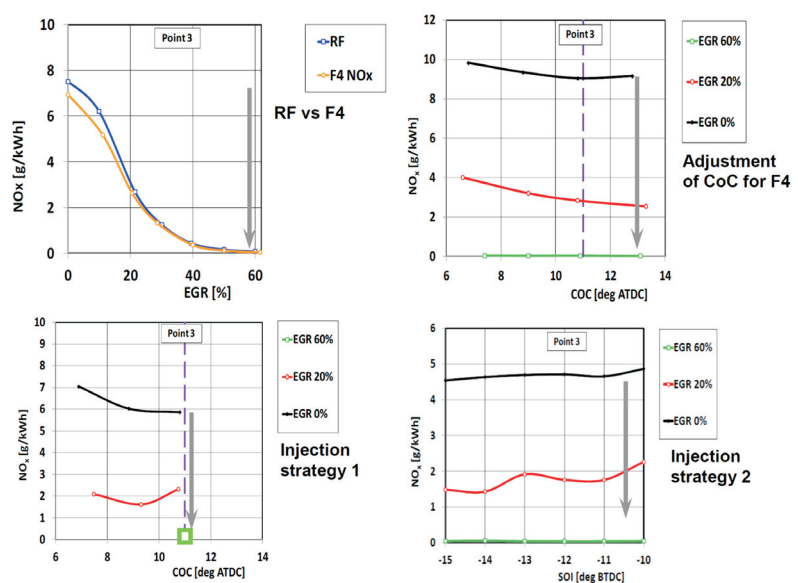


Fig. 20. Methods of lowering NO_x emission by changes in EGR-rate, CoC, SOI, injection strategy – all for operating point 3

Fig. 20. Methods of lowering NO_x emission by changes in EGR-rate, CoC, SOI, injection strategy – all for operating point 3

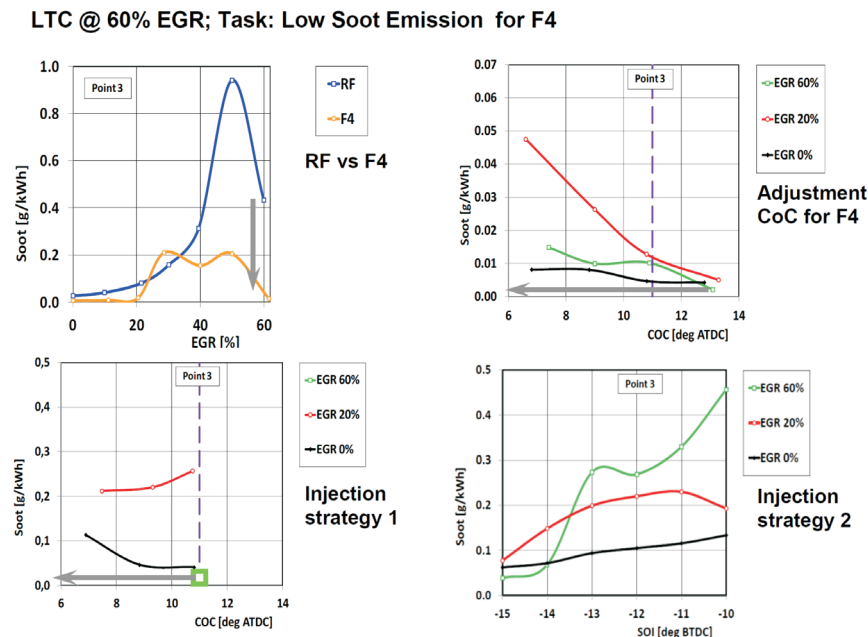


Fig. 21. Methods of lowering soot emission by changes in EGR-rate, CoC, SOI, injection strategy – all for operating point 3

Rys. 21. Sposoby obniżania emisji cząstki stałej przez zmiany: udziału EGR, CoC, SOI oraz wybór strategii wtrysku – wszystko dla 3 punktu pracy silnika

- high EGR – much lower against that for RF.
- 2. Fueling with F4 Soot emission lower for higher EGR-rates and lowest for CoC = 12–13° ATDC.
- 3. For F4 inj. strategy 1 das not allow to operate with late SOI (CoC > 11° ATDC); possible only for EGR = 60% – than the lowest soot emission was achieved.
- 4. For F4 injection strategy 2 allows to operate with various SOI; for highest EGR-rate the higher Soot emission was achieved, lowest when no EGR.

Similar studies were done for searching of possible reduction of fuel consumption by LTC process. The results from

dla dużej recyrkulacji spalin – bardzo mała;

- 2. Przy zasilaniu paliwem F4 emisja NO_x jest mniejsza dla środka spalania CoC przy 11-12° po GMP; mniejsza emisja jest obserwowana przy pracy silnika z większą recyrkulacją spalin;
- 3. Dla paliwa F4 strategia wtrysku nr 1 nie pozwala na pracę silnika z późnym wtryskiem paliwa (środek spalania CoC jest wówczas opóźniony poniżej 11° po GMP); ta strategia jest możliwa tylko dla recyrkulacji 60% – wówczas osiągnięto najmniejszą emisję NO_x ;
- 4. W przypadku paliwa F4 strategia wtrysku nr 2 umożliwia pracę silnika z różnymi kątami początku wtrysku; najmniejsza emisja NO_x została uzyskana dla największych wartości recyrkulacji.

Dla tych warunków podjęto badania zmierzające do oceny, czy wykorzystanie podobnych metod postępowania umożliwi zmniejszenie emisji sadzy (lub cząstek stałych), rys. 21; oto kilka wniosków z tych badań:

- 1. Przy zasilaniu paliwem F4 emisja sadzy (PM) jest nieznacznie mniejsza dla małych wartości recyrkulacji spalin; dla dużej recyrkulacji spalin jest znacznie mniejsza w stosunku do emisji występującej przy zasilaniu olejem napędowym (RF);
- 2. Przy zasilaniu paliwem F4 emisja sadzy jest mniejsza przy większej recyrkulacji spalin oraz mniejsza przy położeniu środka spalania CoC = 12-13° po GMP;
- 3. Dla paliwa F4 strategia wtrysku nr 1 nie pozwala na pracę silnika z dużym opóźnieniem wtrysku (CoC > 11° po GMP); to jest jednak możliwe tylko przy recyrkulacji 60%, przy której uzyskuje się najmniejszą emisję sadzy;
- 4. Dla paliwa F4 strategia wtrysku nr 2 umożliwia pracę silnika z różnymi kątami wyprzedzenia wtrysku; przy największej recyrkulacji spalin uzyskano największą emisję sadzy; najniższa emisja sadzy wystąpiła przy pracy silnika bez recyrkulacji spalin.

Podobne studia zostały przeprowadzone dla stwierdzenia możliwości obniżenia zużycia paliwa w procesie spalania niskotemperaturowym LTC. Ich wyniki zestawiono na rys. 22. Można na nim zauważyć, że dla największej recyrkulacji spalin (60%) jednostkowe zużycie paliwa silnika pracującego na paliwie F4 jest nieznacznie większe niż dla silnika pracującego na oleju napędowym (RF). Ten efekt może być nieznacznie zmniejszony przez przyspieszenie

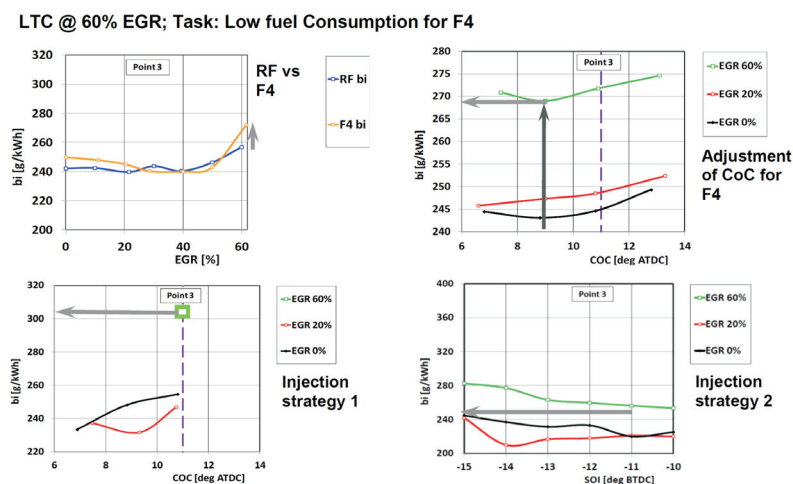


Fig. 22. Methods of lowering specific fuel consumption by changes in EGR-rate, CoC, SOI, injection strategy – all for operating point 3

Rys. 22. Sposoby obniżania jednostkowego zużycia paliwa przez zmiany: udziału EGR, CoC, SOI oraz wybór strategii wtrysku – wszystko dla 3 punktu pracy silnika

them have been summarized in Fig. 22. As one can see, for the highest EGR-rate (60%) the specific fuel consumption for engine operating with fuel F4 (PF 6) is slightly higher than for engine operating with RF. This effect could be slightly reduced by advancing CoC. For further optimization of engine operating injection strategy No. 2 seems to be better than strategy No. 1 because it allows to operate the engine with various SOI. Later SOI of pilot injection leads to lower values of bi for all investigated EGR-rates. In this case EGR 20% was better one.

Acknowledgements

The research leading to these results has received funding from the European Union 7th Framework Program [FP7/2007-2014] under grant agreement No. 234032. The authors are grateful to the funding of EU in the Powerful research project.

Bibliography

- [1] Vanhaelst R., Thiele O., Berg T., Hahne B., Stellet H.-P., Wildhagen F., Hentschel W., Jördens C., Czajka J., Wislocki K., Pielecha I.: Development of an in-cylinder-optical infrared sensor for the determination of EGR and residual gas rates inside SI and diesel engines. XI Congress Engine Combustion Processes, 14-15.03.2013. Ludwigsburg, Germany, pp. 279-290.
- [2] Kaźmierowski J., Pielecha I., Czajka J., Wislocki K., Borowski P.: Investigations of operational and optical indexes of the combustion process for the multiple injection different strategies in CI-type model engine. The 6th European Combustion Meeting ECM 2013, Lund 25-28.06.2013. ss.6
- [3] Pielecha I., Czajka J., Borowski P., Wislocki K.: Research-based assessment of the influence of hydrocarbon fuel atomization on the formation of self-ignition spots and the course of pre-flame processes. Combustion Engines. 2013, 154(3), PTNSS-SC-069. ss. 463-468. ISSN 0138-0346.
- [4] Vanhaelst R., Thiele O., Berg Th., Hahne B., Stellet H.-P., Wildhagen F., Hentschel W., Joerdens Ch., Czajka J., Wislocki K., Pielecha I.: Optical infrared-sensor inside the cylinder to determine the EGR- and residual gas rate in diesel engine. Combustion Engines. 2013, 154(3), 3-11. ISSN 0138-0346. PTNSS-2013-SC-301.

kąta środka spalania. Dalsza optymalizacja pracy silnika jest możliwa przez zastosowanie strategii wtrysku nr 2, która jest lepsza od strategii nr 1, gdyż umożliwia pracę silnika przy różnych kątach wyprzedzenia wtrysku (SOI). Późniejszy wtrysk dawki pilotującej prowadzi do zmniejszenia jednostkowego zużycia paliwa bi dla wszystkich badanych wartości stopnia recyrkulacji spalin. W tym przypadku stwierdzono, że najkorzystniejsza jest recyrkulacja 20%.

Podziękowania

Badania przedstawione w tym artykule były prowadzone w ramach Europejskiego Projektu Badawczego FP7, umowa grantowa nr 234032, POWERtrain for Future Light-duty vehicles. Autorzy wyrażają wdzięczność Komisji Europejskiej za finansowanie badań oraz wszystkim osobom, które uczestniczyły w tej pracy i w badaniach laboratoryjnych.

- [5] Kaźmierowski J., Pielecha I., Czajka J., Wislocki K., Borowski P., Kałużny, J.: Investigations of Operational and Optical Indexes of the Combustion Process for the Multiple Injection Different Strategies in CI-Type Model Engine. Combustion Engines. 2013, 154(3), PTNSS-SC-117, 677-685. ISSN 0138-0346.
- [6] Wittka, T., Holderbaum, B., Maunula, T., and Weissner, M., Development and Demonstration of LNT+SCR System for Passenger Car Diesel Applications, SAE Int. J. Engines 7(3):2014, doi:10.4271/2014-01-1537
- [7] Maunula, T., NOx Reduction with the Combinations on LNT and SCR in Diesel Applications, SAE Int. J. Mater. Manf. 7(1):195-206, 2013, doi:10.4271/2013-24-0161.
- [8] Maunula, T., Kinnunen, T., Kanninen, K., Viitanen, A. et al., Thermally Durable Vanadium-SCR Catalysts for Diesel Applications, SAE Technical Paper 2013-01-1063, 2013, doi:10.4271/2013-01-1063.
- [9] Wittka T., Holderbaum B., Körfer T., Pischinger S., Reformer-Based System for Exhaust Aftertreatment at Low Temperatures. MTZ worldwide January 2014, Volume 75, Issue 1, pp 36-41

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

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

e-mail: jakub.czajka@put.poznan.pl



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

Prof. nzw. dr hab. inż. Krzysztof Wislocki – Profesor nzw. na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

e-mail: krzysztof.wislocki@put.poznan.pl



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

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

e-mail: ireneusz.pielecha@put.poznan.pl



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

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

e-mail: przemyslaw.t.borowski@doctorate.put.poznan.pl

