

## Impact of symmetrical division of initial dosage diesel oil on the selected thermodynamic parameters of the working medium and operation parameters dual fuel engine fuelled CNG

*Abstract: The paper shows the impact of division and quantity pilot dose on selected operation parameters dual fuel engine fuelled CNG. The primary objective of this study was identify why the means of pilot dose division affect on the combustion process, economic and environmental performance of the engine and determine feasibility of optimal control of diesel injection dose. Studies have shown a beneficial effect dose distribution (for two and three single dose) on the engine parameters. Observed increase the overall efficiency of the engine, reducing  $\text{NO}_x$  concentration, maximum pressure, rate of pressure rise, the heat release rate and temperature of medium. Pointed to the possibility of a significant reduction of  $\text{NO}_x$  emissions by splitting the dose and longer delay the injection of additional doses.*

Keywords: dual fuelling, natural gas, divided dose, heat release rate, combustion

### Wpływ symetrycznego podziału dawki inicjującej ON na wybrane parametry termodynamiczne czynnika roboczego oraz wskaźniki pracy silnika dwupaliwowego zasilanego CNG

*Streszczenie: W pracy przedstawiono wpływ podziału i wielkości dawki inicjującej na wybrane parametry pracy silnika dwupaliwowego zasilanego CNG. Podstawowym celem pracy było wskazanie jak sposób podziału dawki inicjującej wpływa na przebieg procesu spalania, parametry ekonomiczne i ekologiczne silnika oraz określenie możliwości optymalnego doboru sterowania wtryskiem dawki oleju napędowego. Badania pokazały korzystny wpływ podziału dawki (na dwie i trzy pojedyncze dawki) na parametry silnika. Obserwowano wzrost sprawności ogólnej silnika, zmniejszenie stężenia  $\text{NO}_x$ , ciśnień maksymalnych, szybkości narastania ciśnienia, szybkości wydzielania ciepła i temperatur czynnika. Wskazano na możliwości istotnej redukcji emisji  $\text{NO}_x$  przez podział dawki i wydłużanie opóźnienia wtrysku dawek dodatkowych.*

Słowa kluczowe: zasilanie dwupaliwowe, gaz ziemny, dawka dzielona, szybkość wydzielania ciepła, spalanie

## 1. Wstęp

Podstawowym celem stosowania CNG w silnikach spalinowych jest obniżenie kosztów eksploatacji. W zastosowaniach praktycznych CNG stosuje się zarówno w silnikach o zapłonie iskrowym jak i w silnikach o zapłonie samoczynnym. W silnikach o ZI, CNG ze względu na swoje podobieństwo parametrami fizyko-chemicznymi do benzyn (liczba oktanowa, kinetyczny mechanizm spalania) ulega zapłonowi w sposób charakterystyczny dla tego typu silników, od wytworzonej iskry zapłonowej. W silniku o ZS, ze względu na małą liczbę cetanową i wysoką temperaturę samozapłonu CNG, do zapłonu mieszaniny powietrza i gazu ziemnego wykorzystuje się wtrysk niewielkiej ilości oleju napędowego, której zadaniem jest wytworzenie ognisk samozapłonu do inicjacji spalania [1, 2, 9]. W literaturze, zasilany w ten sposób silnik nosi nazwę silnika dwupaliwowego z inicjującą dawką oleju napędowego [1, 2, 3, 4].

Dla minimalizacji kosztów eksploatacji zasadnym jest stosowanie możliwie najmniejszych dawek inicjujących ON. Rozwiązanie to sprawdza się dla silników stacjonarnych pracujących ze stałym, bliskim maksymalnemu, obciążeniem [1, 2, 9]. Dla silników trakcyjnych, które w przeważającej części

pracują w zakresie małych i średnich obciążeń takie założenia regulacyjne nie są optymalne [3, 4, 5, 6, 9].

W silniku dwupaliwowym spalanie oleju napędowego (ON) inicjuje zapłon obecnej w komorze spalania mieszaniny gaz-powietrze. W przypadku wtrysku jednoczęściowej dawki inicjującej oleju napędowego spalanie obydwu paliw rozpoczyna się jednocześnie, a dalszy jego przebieg jest zależny od proporcji energii dostarczonej wraz z paliwem ciekłym i gazowym [1, 3, 9].

W przypadku małych dawek inicjujących tylko niewielka część mieszaniny gaz-powietrze jest objęta strumieniem wtrysniętego oleju napędowego. Zmniejszona koncentracja tlenu oraz bezpośrednie sąsiedztwo ognisk samozapłonu w strefie objętej przez strugę paliwa ciekłego sprzyjają jej szybkiemu spalaniu. Na zewnątrz tej strefy mieszanina gaz-powietrze jest mocno zubożona co znacznie pogarsza warunki jej spalania [3, 9]. Obserwowany przebieg wydzielania ciepła jest w swej początkowej fazie bardzo intensywny, a w miarę wzrostu obciążenia silnika ulega znacznemu wydłużeniu [8]. Silnik pracujący w takich warunkach osiąga wysokie wartości przyrostu ciśnienia co przekłada się bezpośrednio na wysokie ciśnienia maksymalne obiegu oraz wysokie średnie tempera-

tury. Objawia się to głośną pracą silnika, podwyższoną toksycznością spalin w zakresie  $\text{NO}_x$  oraz może sprzyjać jego mniejszej trwałości. W szczególności dotyczy to silnika pracującego w zakresie małych i średnich obciążeń (spalanie mieszaniny gaz-powietrze przy dużym nadmiarze powietrza).

Powiększenie dawki inicjującej oleju napędowego oraz zachowanie jej jednoczęściowego charakteru powoduje, że proces wydzielania ciepła przebiega niemal analogicznie jak dla tradycyjnie zasilanego silnika o ZS [3, 9].

Dopiero wprowadzenie parametrów regulacyjnych pracy wtryskiwacza ON, takich jak podział sygnału sterującego na dwie lub więcej części, pozwala w dowolny sposób kształtować szybkość wydzielania ciepła [3, 5-7]. Ponieważ przebieg procesu spalania, a szczególnie szybkość wydzielania ciepła, determinuje parametry zewnętrzne pracy silnika, istnieje możliwość kształtowania go w taki sposób, aby spełnić stawiane kryteria w każdym zakresie pracy silnika.

W artykule przedstawiono wybraną analizę wpływu regulacji pracy wtryskiwacza ON na parametry spalania w silniku dwupaliwowym w pełnym zakresie obciążeń pracy silnika.

## 2. Cel, zakres i obiekt badań

Praktycznym celem omawianych badań było określenie warunków regulacji układu wtryskowego ON (wielkość i podział dawki inicjującej ON), dla których uzyskuje się możliwie najwyższą sprawność silnika zasilanego głównie CNG.

Obiektem badań był jednocylindrowy silnik badawczy SB3.1 z wtryskiem bezpośrednim o pojemności 1848  $\text{cm}^3$ , wyposażony w układ zasilania olejem napędowym typu Common Rail z elektromagnetycznymi wtryskiwaczami drugiej generacji. Dane techniczne silnika przedstawiono w tabeli 1, a widok stanowiska badawczego na rys. 1.

Badania doświadczalne zostały poprzedzone analizami symulacyjno-numerycznymi procesów spalania dla różnych strategii wtrysku wielofazowego dawki inicjującej ON, uwzględniających sposób podziału i wielkość dawki. Pozwoliło to na sformułowanie wniosku (motto badań), że istnieje możliwość dobrania takiej regulacji wtrysku oleju napędowego, przy której uzyskuje się wysoką sprawność silnika dwupaliwowego, porównywalną do silnika zasilanego tradycyjnie.

Table 1. Technical data of the SB3.1 engine

Tabela 1. Dane techniczne silnika SB3.1

Number of cylinders/ Liczba cylindrów	1
Bore/ Średnica cylindra	127 mm
Stroke/ Skok tłoka	146 mm
Displacement volume/ Objętość skokowa	1848 $\text{cm}^3$
Compression ratio/ Stopień sprężania	15,8

Rated power / Moc znamionowa	22,8 kW
Engine speed of rated power/ Prędkość obrotowa mocy znamionowej	2200 rpm obr/min
Type of combustion chamber/ Typ komory spalania	Direct injection to toroidal chamber in piston crown Wtrysk bezpośredni do toroidalnej komory w tłoku
Injection system of initial dose/ Układ wtryskowy dawki inicjującej	Common Rail, produced by Bosch Common Rail f-my Bosch
Diesel oil injector, produced by Bosch/ Wtryskiwacz ON firmy Bosch	0986435 004 090
CNG injection system / Układ wtryskowy CNG	IC
Injector of gas, produced by Bosch/ Wtryskiwacz gazu Bosch	F465 151 72
Injection pressure of gas/ Ciśnienie wtrysku gazu	1 MPa

Schemat podziału dawki i parametrów regulacyjnych przedstawiono na rys. 2. Zadane wielkości sterowania w jednostkach kątowych po przeliczeniu przez sterownik na jednostki czasowe podawane były do wtryskiwacza układu *common rail*. Przeprowadzone badania obejmowały pomiary parametrów procesu spalania, osiągow silnika oraz zawartości toksycznych składników w spalinach w ustabilizowanych warunkach pracy, przy różnych obciążeniach i różnych prędkościach obrotowych. Parametrami regulacyjnymi układu wtryskowego był sposób podziału sygnału elektrycznego wyzwalającego otwarcie wtryskiwacza dawki inicjującej ON (realizacja wtrysku wielofazowego) do których należą:

- czas trwania sygnału elektrycznego dla każdej z części dawki  $d_1, d_2, d_3$ ,
- czas przerwy pomiędzy sygnałami elektrycznymi  $t_1, t_2$ ,
- ogólna dawka ON określana jako procent ilości energii wykorzystanej do zasilania silnika.



Fig. 2. Scheme of multiple injection of pilot dose Diesel oil

Rys. 2. Schemat parametrów regulacyjnych wielofazowego wtrysku dawki inicjującej ON

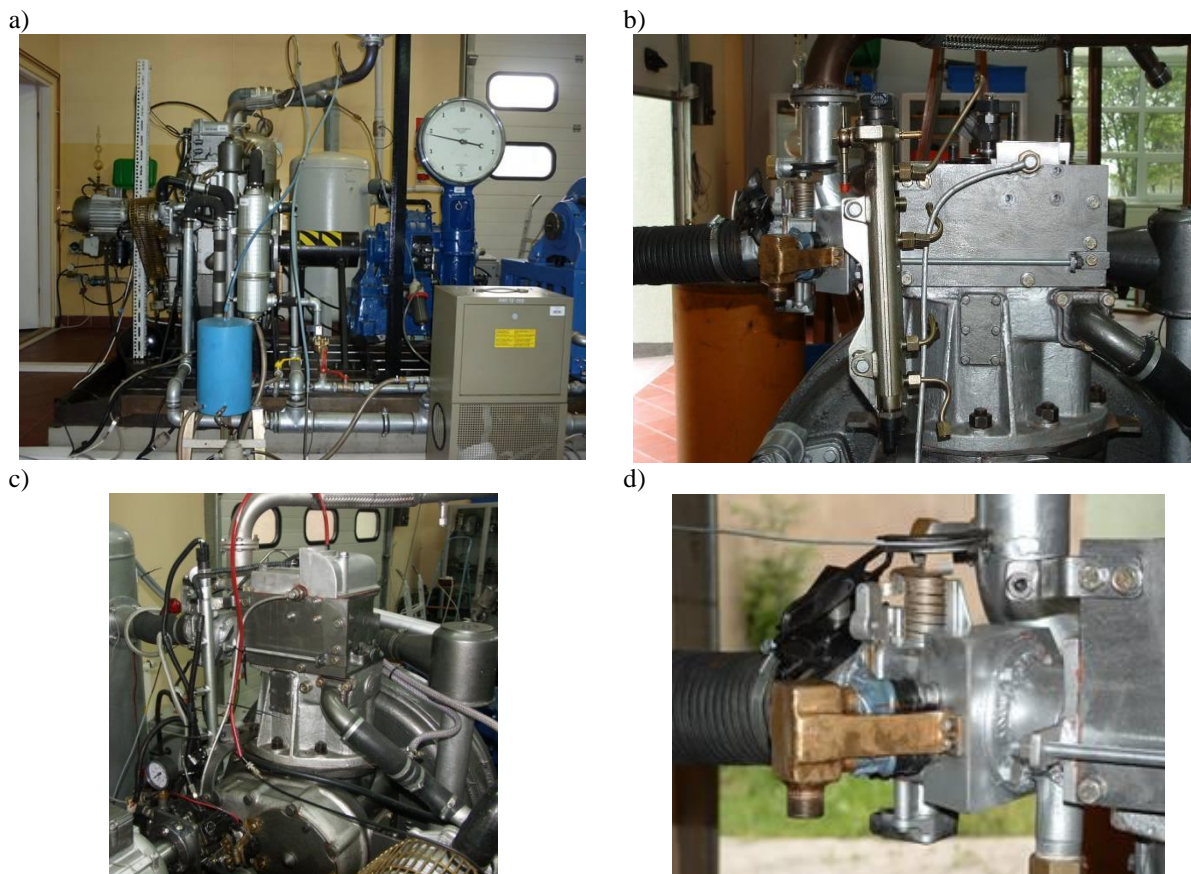


Fig. 1. General view of the test bed: a) view of the bed, b) common rail and Diesel oil injector, c) indicator system, d) CNG injector

Rys. 1. Widok stanowiska badawczego: a) widok ogólny stanowiska, b) szyna paliwowa i wtryskiwacz, c) układ do indykowania, d) wtryskiwacze gazu

### 3. Analiza wyników badań

Ze względu na obszerność przeprowadzonych badań w artykule przedstawiono jedynie wybrane fragmenty nawiązujące do sformułowanego wcześniej motta badań.

Analiza wyników dotyczy badań przeprowadzonych dla wtrysku dawki inicjującej ON, której podział jest symetryczny (sygnał elektryczny czasu otwarcia wtryskiwacza dla pierwszej części dawki inicjującej jest taki sam jak dla części drugiej), natomiast zmianie ulega długość czasu przerwy pomiędzy sygnałami. Jest ona określona jako ilość stopni obrotu wału korbowego i wynosi odpowiednio  $10^{\circ}\text{OWK}$  i  $15^{\circ}\text{OWK}$ . Zmieniano również wielkość dawki ON. Ze względu na parametry konstrukcyjne układu wtryskowego oraz wielkość obiektu badań (duża pojemność skokowa) dawkę inicjującą ustalono jako  $30 [\text{mm}^3/\text{cykl}]$  i  $40 [\text{mm}^3/\text{cykl}]$ . W zależności od obciążenia silnika w badaniach stanowiło to  $33\% \pm 67\%$  ogólnej ilości energii dostarczanej do silnika

W artykule pominięto analizy zmiany kąta wyprzedzenia wtrysku, który niewątpliwie jest ważnym parametrem regulacyjnym układu wtryskowe-

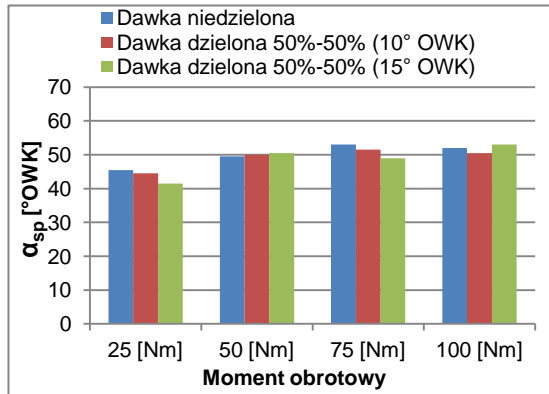
go, szczególnie w funkcji prędkości obrotowej. Z tego też powodu przedstawione wyniki dotyczą prędkości obrotowej wału silnika wynoszącej  $1400 [\text{obr}/\text{min}]$ , dla których optymalna wartość  $\Theta_{\text{ww}}=22^{\circ}\text{OWK}$  została ustalona w odrębnych badaniach.

Ze względu na przejrzystość i interpretację otrzymanych wyników zrezygnowano również z przedstawienia wyników badań obejmujących zmiany ciśnienia wtryskiwanej dawki inicjującej ON. Parametr ten ze względu na jakość tworzonej mieszaniny palnej również ma istotny wpływ na przebieg procesu spalania oraz szybkość przejmowania ciepła przez czynnik roboczy. W artykule wykorzystano badania, dla których wartość ciśnienia wtrysku była stała i wynosiła  $70 [\text{MPa}]$ .

#### 3.1. Wpływ parametrów regulacyjnych układu wtryskowego dawki inicjującej ON na długość procesu spalania

Na rys. 3 przedstawiono długość procesu spalania zdefiniowaną w badaniach przez punkt początku wydzielania ciepła oraz punkt końca przejmowania

wania ciepła przez czynnik. Punkt początku wydzielania ciepła wyznaczano przez poszukiwanie punktu przegięcia krzywej ciśnienia. Za punkt końca przyjmowania ciepła przez czynnik przyjmowano równość wykładnika adiabaty  $\kappa$  i chwilowego wykładnika politropy rozprężania  $m_r$ . Kąt wyprzedzenia dawki inicjującej wtrysku był ustalony i wynosił  $22^\circ$  OWK przed GMP.



Z przedstawionych danych doświadczalnych wynika, że podział dawki inicjującej ON w zakresie małych i średnich obciążeń silnika w nieznaczny sposób wpływa na długość procesu spalania, a jego wpływ staje się zauważalny wraz ze wzrostem obciążenia silnika przy zwiększającym się udziale dawki inicjującej.

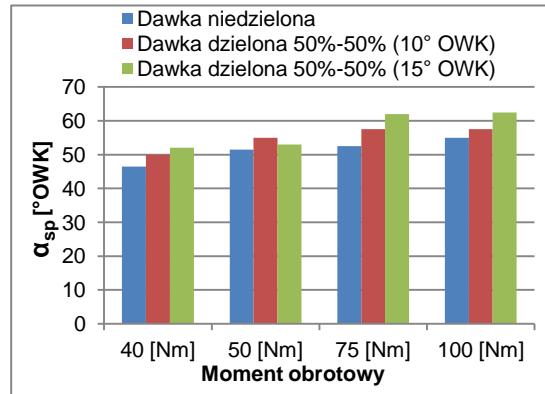
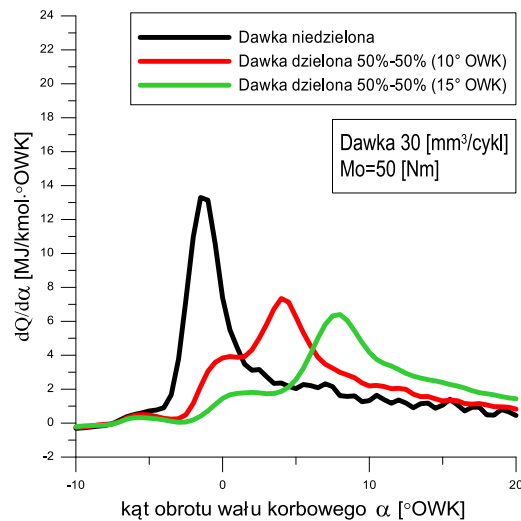
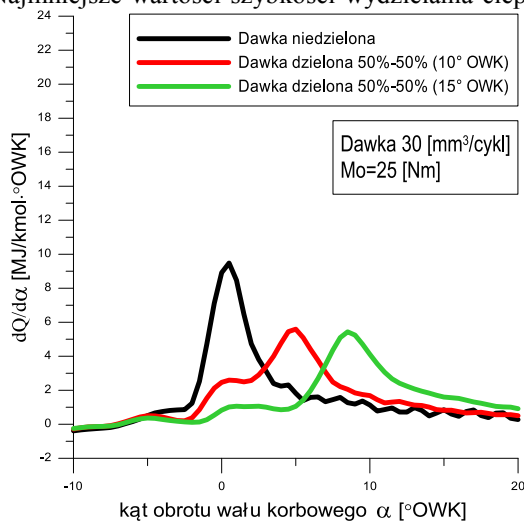


Fig. 3. Angle of combustion for doses  $30 \text{ mm}^3/\text{cycle}$  (left) and  $40 \text{ mm}^3/\text{cycle}$  (right)  
Rys. 3. Kąt spalania dla dawek  $30 \text{ mm}^3/\text{cykl}$  (lewy) i  $40 \text{ mm}^3/\text{cykl}$  (prawy)

### 3.2. Wpływ parametrów regulacyjnych układu wtryskowego dawki inicjującej ON na szybkość wydzielania ciepła.

W całym zakresie obciążeń silnika symetryczny dwufazowy podział sygnału sterującego zmniejsza maksymalne szybkości wydzielania ciepła. Zakres tych zmian jest jednak ściśle uwarunkowany wielkością dawki inicjującej ON i obciążenia silnika. Najmniejsze wartości szybkości wydzielania ciepła

obserwowano dla małych wielkości dawek inicjujących ( $30 \text{ mm}^3/\text{cykl}$ ). Jednocześnie maksymalne wartości szybkości wydzielania ciepła występują później względem GMP niż dla jednofazowego sygnału sterującego. Opóźnienie to powiększa się wraz ze wzrostem przerwy pomiędzy sygnałami sterującymi i osiąga największe wartości w zakresie niskich obciążeń silnika. Natomiast wraz ze wzrostem obciążenia maksymalne wartości szybkości wydzielania ciepła przesuwają się bliżej GMP.





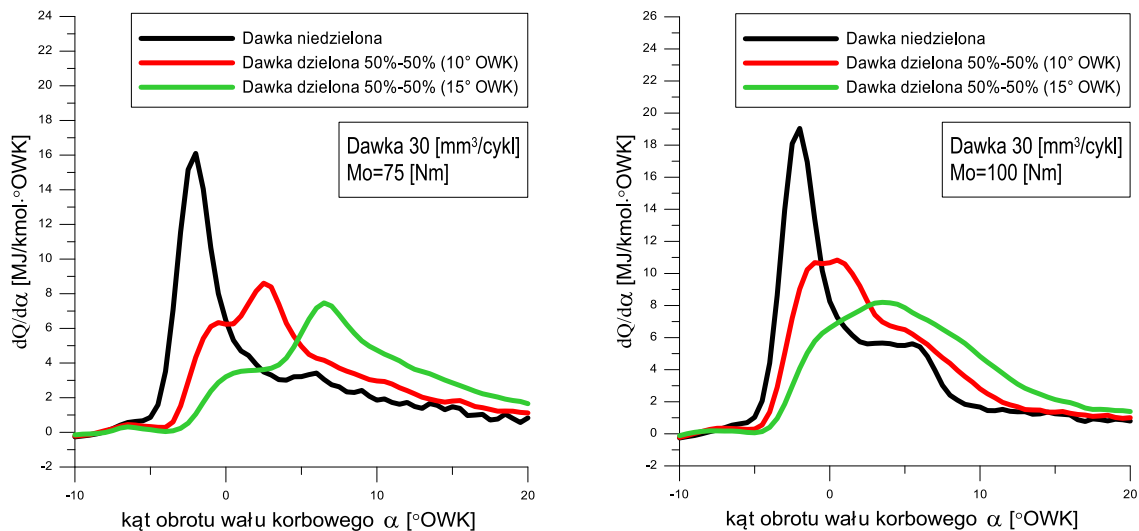


Fig. 4. Comparison of heat release rate  $dQ/d\alpha$  for pilot dose  $30 \text{ mm}^3/\text{cycle}$   
 Rys. 4. Porównanie szybkości wydzielania ciepła  $dQ/d\alpha$  dla dawki  $30 \text{ mm}^3/\text{cykl}$

Wzrost dawki inicjującej ON do  $40 \text{ mm}^3/\text{cykl}$  w znaczący sposób przyspiesza kąt występowania maksymalnych szybkości wydzielania ciepła przy zachowaniu jego małych wartości. Tylko dla zakresu średnich obciążeń przy realizacji długiej przerwy pomiędzy sygnałami sterującymi kąt ten pozostaje znacznie opóźniony.

Przebiegi szybkości wydzielania ciepła dla dawki inicjującej ON wynoszącej  $30 \text{ mm}^3/\text{cykl}$  przedstawia rysunek 4. Syntetycznie zebrane wielkości szybkości wydzielania ciepła oraz odpowiadające im kąty przedstawiono na rysunku 5.

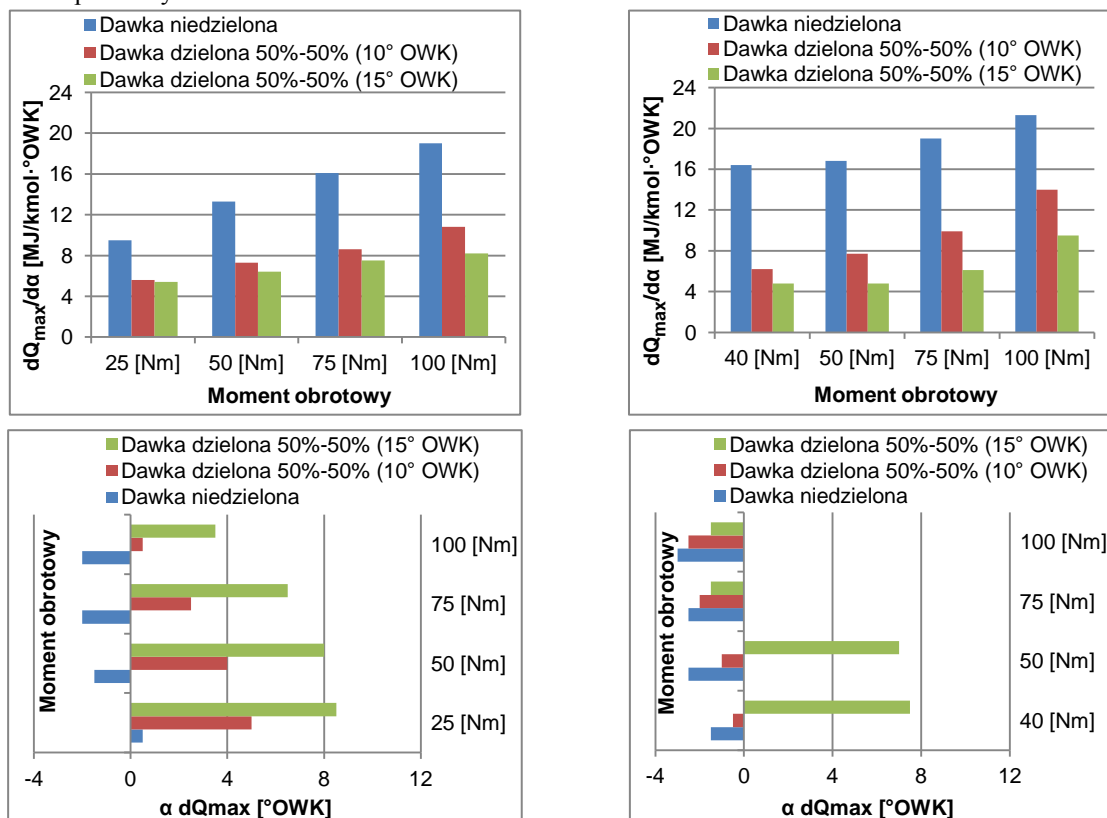


Fig. 5. Comparison of maximal heat release rate and corresponding crank angle for pilot dose  $30 \text{ mm}^3/\text{cycle}$  (left) and  $40 \text{ mm}^3/\text{cycle}$  (right)  
 Rys. 5. Porównanie maksymalnej szybkości wydzielania ciepła i odpowiadającego im kąta dla dawek  $30 \text{ mm}^3/\text{cykl}$  (rys. lewy) i  $40 \text{ mm}^3/\text{cykl}$  (rys. prawy)

### 3.3. Wpływ parametrów regulacyjnych układu wtryskowego dawki inicjującej ON na maksymalne ciśnienia i temperatury czynnika roboczego

Zmniejszona dynamika wydzielania ciepła bezpośrednio przekłada się na szybkość przyrostu ciśnienia  $dp/da$  w czasie spalania. Dla symetrycznego dwufazowego podziału sygnału sterującego przyrost ciśnienia jest znacznie mniejszy niż dla sygnału jednofazowego i maleje wraz ze wzrostem przerwy międzyfazowej przy czym dla małych obciążeń silnika osiąga mniej niż 50% wartości odniesienia (dawka niedzielona). Maksimum przy-

rostu ciśnienia jest przesunięte względem GMP w kierunku późniejszych kątów.

Małe przyrosty ciśnienia przy zachowaniu stałych długości procesu spalania są powodem znacznie mniejszych ciśnień w komorze spalania dla silnika zasilanego według przyjętej koncepcji. Maksymalne wartości ciśnień szczególnie w zakresie małych obciążeń silnika są znacznie przesunięte względem GMP tłoka. Opóźnienie w stosunku do sygnału jednofazowego wynosi odpowiednio  $5^\circ\text{OWK}$  i  $10^\circ\text{OWK}$ . Dla silnika pracującego z dużym obciążeniem charakter krzywych narastania ciśnienia jakościowo staje się podobny jak dla sygnału jednofazowego.

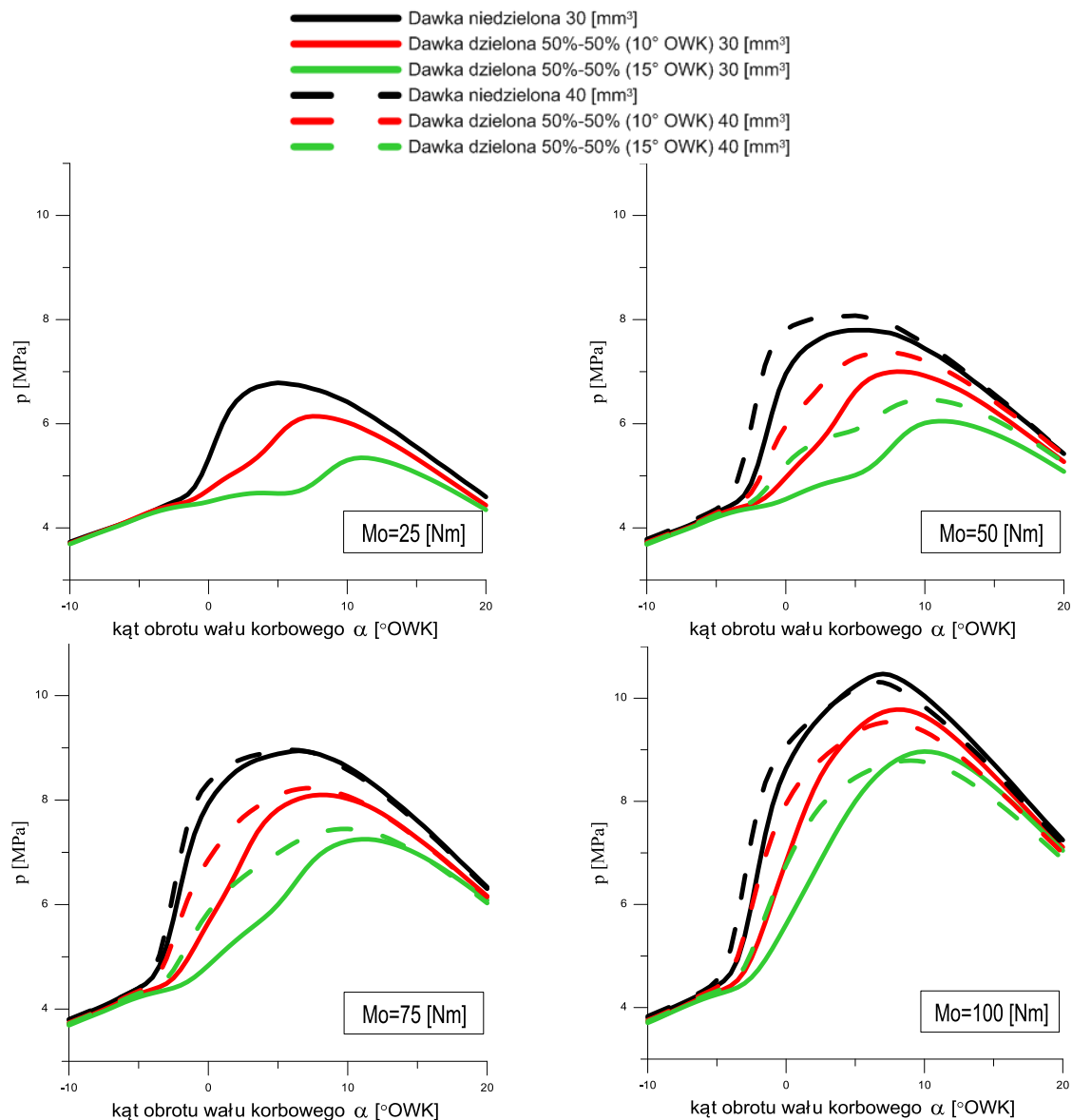
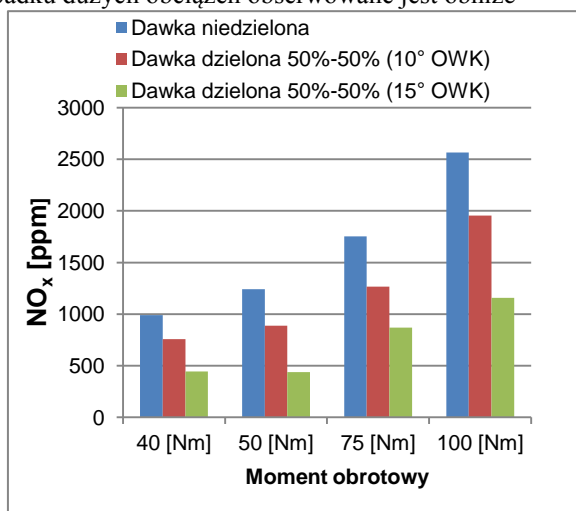


Fig. 6. Comparison of pressure during combustion for various pilot dose division and engine load: 25, 50, 75, 100 Nm

Rys. 6. Porównanie ciśnienia podczas spalania dla różnych podziałów dawek i różnego obciążenie silnika: 25, 50, 75, 100 Nm

Wzrost wielkości dawki inicjującej powoduje przyspieszenie procesu spalania. W zakresie małych i średnich obciążeń powoduje też nieznaczny wzrost ciśnień maksymalnych. Natomiast w przypadku dużych obciążeń obserwowane jest obniżenie



nie wartości maksymalnych. Obserwowane są również niższe średnie wartości temperatur co bezpośrednio wpływa na obniżenie zawartości tlenków azotu w spalinach, rys. 7.

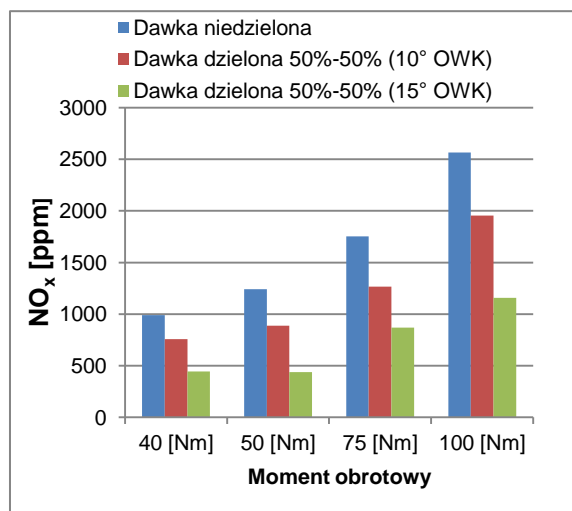


Fig. 7. Comparison of NO<sub>x</sub> concentration in exhaust for pilot dose 30 mm<sup>3</sup>/cycle (left) and 40 mm<sup>3</sup>/cycle (right)  
Rys. 7. Porównanie stężenia NO<sub>x</sub> w spalinach dla dawek inicjujących ON 30 mm<sup>3</sup>/cykl i 40 mm<sup>3</sup>/cykl

### 3.4. Wpływ parametrów regulacyjnych układu wtryskowego dawki inicjującej ON na sprawność silnika.

Analiza sprawności ogólnej silnika podczas przeprowadzonych badań potwierdziła słuszność przyjętej koncepcji sterowania wtryskiem dawki inicjującej ON. Zwiększono sprawność w najbar-

dziej newralicznym zakresie obciążeń silnika trakcyjnego. Dla małych i średnich obciążeń uzyskano poprawę sprawności ogólnej silnika o 1÷3% w stosunku do zasilania jednoczęściową dawką inicjującą ON. Wzrost sprawności uzyskano ponadto w połączeniu z ograniczeniem maksymalnych ciśnień i temperatur czynnika roboczego.

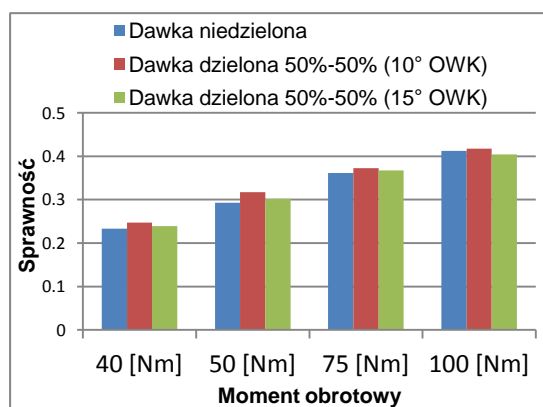
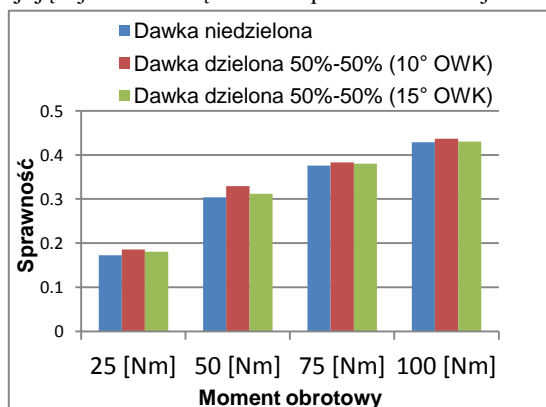


Fig. 8. Comparison of thermal efficiency for pilot dose 30 mm<sup>3</sup>/cycle (left) and 40 mm<sup>3</sup>/cycle (right)  
Rys. 8. Porównanie sprawność silnika dla dawek inicjujących ON 30 mm<sup>3</sup>/cykl i 40 mm<sup>3</sup>/cykl

## 4. Podsumowanie i wnioski

1. Przeprowadzone badania wielofazowego wtrysku dawki inicjującej ON, potwierdziły możliwość zwiększenia sprawności silnika w obszarze małych i średnich obciążeń. Jest to szczególnie istotna zaleta w przypadku trakcyjnych zastosowań silnika spalinowego.

2. Poprzez sterowanie podziałem i wielkością dawki inicjującej ON można w dowolny sposób kształtować przebieg wydzielania ciepła, a w konsekwencji termodynamicznymi parametrami czynnika roboczego. Ograniczenie szybkości narastania ciśnienia oraz jego maksymalnych bezwzględnych wartości powinno w znaczący sposób zwiększyć trwałość elementów roboczych silnika zapewniając jego dłuższy okres

- międynaprawczy. Z kolei ograniczenie średnich i maksymalnych temperatur korzystnie wpływa na poziom powstających w trakcie procesu spalania tlenków azotu.
3. Duża liczba parametrów regulacyjnych układu wymaga bardzo starannego opracowania algorytmu sterowania silnika dostosowanego bezpośrednio do obiektu zasilania. Przedstawione wyniki badań pokazują

zują tylko zasadność stosowania tego typu rozwiązań.

4. Autorzy opracowania zdają sobie również sprawę, że algorytm sterowania powinien zostać opracowany na podstawie rzeczywistego dawkowania ON możliwego do określenia tylko w komorze przeznaczonej do indykowania wielkości dawki wtrysku. Dalsze badania prowadzą właśnie w tym kierunku.

### Nomenclature/Skróty i oznaczenia

CNG	Compressed Natural Gas/ <i>sprężony gaz ziemny</i>	°OWK	stopień obrotu wału korbowego
GMP	górne martwe położenie tłoka	NO <sub>x</sub>	tlenki azotu
Θ <sub>ww</sub>	kąt wyprzedzenia wtrysku	α <sub>sp</sub>	kąt spalania
ON	olej napędowy	dQ/da	szybkość wydzielania ciepła

### Bibliography/Literatura

- [1]. Friedeman Z.: Gasmotoren. Vogel Buchverlag, Würzburg, 2001.
- [2]. Matyjasik M.: „*Aktywizacja procesu spalania mieszaniny gaz-powietrze w silnikach dwupaliwowych przez podział dawki inicjującej oleju napędowego*”. Praca doktorska, Bielsko-Biała 2012.
- [3]. Stelmasiak Z., Larisch J., Gilowski T., Matyjasik M.: “*The optimization of combustion process in a dual fuel engine with Common Rail and gas injection systems*”, International Congress on Combustion Engines PTNSS KONGRES-2007 „*THE DEVELOPMENT OF COMBUSTION ENGINES*”, 2007.
- [4]. Pietras D.: “*Evaluation the sound pressure level of the small CI engine*”. Combustion Engines SC1 (Powertrain, Design, Ecology&Diagnostics) 2009, str. 204-207.
- [5]. Pietras D., Gilowski T., Knefel T.; „*A program to analyze the combustion process in diesel engine*”, Combustion engines No. 3/2011 (146), ISSN 0138-0346.
- [6]. Pietras D.; „*Evaluation of the fuel dose distribution on the combustion process in a small diesel engine*”, Combustion engines No. 3/2011 (146), ISSN 0138-0346.
- [7]. Kowalewicz A. “*Podstawy procesów spalania*”. WNT Warszawa 2000.
- [8]. Stelmasiak Z.: „*Studium procesu spalania gazu w dwupaliwowym silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym gazem ziemnym i olejem napędowym*”, Wydawnictwo ATH w Bielsku-Białej, Rozprawy naukowe Nr 5, Bielsko – Biała, 2003.

Mr Tomasz Gilowski, MSc., – Assistant in the Faculty of Mechanical Engineering at University of Bielsko-Biała.

*Mgr inż. Tomasz Gilowski – asystent na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej.*



Mr Zdzisław Stelmasiak, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Mechanical Engineering at University of Bielsko-Biała

*Dr hab. inż. Zdzisław Stelmasiak – profesor na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej.*

