

## The Possibility of Smoke Reducing in an CI Engine Using CNG

*Abstract. The paper presents preliminary studies on the possibility of reducing smoke in a diesel engine using CNG injection, and analyzed the impact of additional fuel gas to the engine performance. Presented in the paper a preliminary study was carried out on a one cylinder, naturally aspirated diesel engine SB3.1 equipped with Common Rail injection system. The research engine was equipped with fuel injection system of natural gas to the intake manifold. The performance was performed as a function of the share of gas in relation to the all energy cycle (CNG and diesel oil). During the measurements recorded opacity, NO<sub>x</sub>, HC and CO. Based on recorded pressure waveforms were analyzed the impact of CNG in the thermal efficiency and other combustion parameters of the engine.*

Keywords: diesel engine, dual fuel engine, CNG injection, smoke opacity

## Możliwości ograniczenia zadymienia spalin silnika o zapłonie samoczynnym za pomocą dodatku CNG

### Streszczenie:

*W pracy przedstawiono badania dotyczące możliwości ograniczenia zadymienia spalin w silniku o zapłonie samoczynnym za pomocą wtrysku CNG oraz przeanalizowano wpływ dodatkowego paliwa gazowego na parametry pracy silnika. Przedstawione w pracy wstępne badania silnikowe przeprowadzono na jednocylindrowym, wolnossącym silniku badawczym o zapłonie samoczynnym typ SB3.1 zasilanym układem wtryskowym Common-Rail i układem wtryskowym gazu ziemnego do kolektora dolotowego. Charakterystyki wykonano w funkcji udziału paliwa gazowego w całkowitej dawce energii dostarczanej do silnika. W czasie pomiarów rejestrowano zadymienie spalin, emisję NO<sub>x</sub>, THC i CO. Przeprowadzono również indykowanie silnika i na podstawie zarejestrowanych przebiegów ciśnień wykonano obliczenia cieplne i analizy wpływu zasilania CNG na sprawność cieplną obiegu i inne parametry pracy silnika.*

Słowa kluczowe: Silnik o zapłonie samoczynnym, silnik dwupaliwowy, wtrysk CNG, zadymienie spalin.

### 1. Wstęp

Gaz ziemny, ze względu na zasoby, cenę i dostępność może być z powodzeniem traktowany jako paliwo alternatywne, również w silnikach o zapłonie samoczynnym. Przy czym może być stosowany zarówno jako paliwo główne, ale również jako paliwo uzupełniające, wpływając korzystnie na przebieg procesu spalania, ograniczając emisję składników toksycznych w spalinach. Silniki ZS pracujące w systemie dwupaliwowym wykazują szereg istotnych zalet w stosunku do silników zasilanych olejem napędowym. Jedną z nich jest mniejsza emisja cząstek stałych przy maksymalnych obciążeniach silnika, ale również przy pracy w stanach nieustalonych. Przedstawione wstępne badania silnikowe, których celem była ocena możliwości ograniczenia zadymienia spalin silnika o zapłonie samoczynnym przez zastosowanie niewielkiego dodatku CNG, przeprowadzono na jednocylindrowym silniku badawczym o zapłonie samoczynnym typ SB3.1. Silnik badawczy wyposażono w układ wtryskowy gazu ziemnego do kolektora dolotowego. Wtrysk dawki oleju napędowego realizowany był przez wysokociśnieniowy system akumulatorowy CR zapewniający wysoką jakość wtrysku. Zmiany wielkości dawek oleju napędowego, ilości wtryskiwanego gazu i pozostałych parametrów regulacyjnych silnika dokonywa-

no przy pomocy opracowanych i wykonanych w Katedrze Silników Spalinowych i Pojazdów ATH w Bielsku-Białej prototypowych sterowników umożliwiających elektroniczne sterowanie parametrami wtrysku obydwu paliw. W czasie pomiaru mierzono chwilowe zużycie oleju napędowego, zadymienie spalin, emisję NO<sub>x</sub>, THC i CO. Wielkość jednostkowej dawki CNG określano na podstawie rejestrowanego czasu wtrysku gazu i na podstawie charakterystyki wtryskiwacza gazowego. W czasie badań przeprowadzono również indykowanie silnika i na podstawie zarejestrowanych przebiegów ciśnień wyznaczono następujące parametry pracy silnika: ciśnienie maksymalne w cylindrze w czasie spalania, temperaturę maksymalną czynnika, maksymalny przyrost ciśnienia, maksymalny przyrost ciepła, kąt OWK w punkcie początku spalania, długość procesu spalania, średnie ciśnienie indykowane pełnego obiegu i pętli przepływania, sprawność cieplną obiegu itp. W publikacji przedstawiono analizę wybranych parametrów pracy silnika.

### 2. Stanowisko badawcze

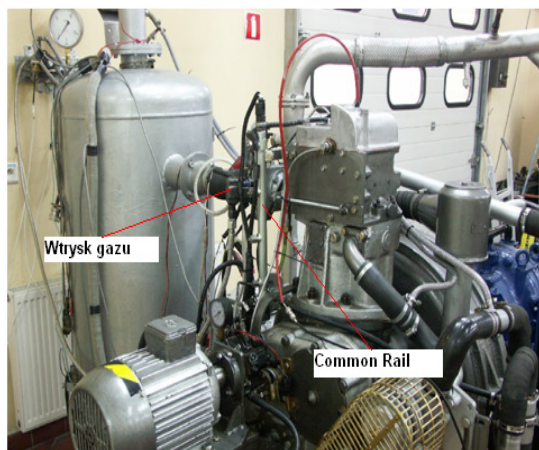
Badania przeprowadzono na jednocylindrowym silniku badawczym o zapłonie samoczynnym i wtrysku bezpośrednim SB3.1 produkcji Zakładów

„WSK-PZL” Mielec. Dane techniczne silnika przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Dane techniczne silnika SB3.1

Liczba cylindrów	1
Srednica cylindra	127 mm
Skok tłoka	146 mm
Objętość skokowa	1848 cm <sup>3</sup>
Stopień sprężania	15,8
Moc znamionowa	22,8 kW
Prędkość obrotowa mocy znamionowej	2200 obr/min
Typ komory spalania	Wtrysk bezpośredni
Układ wtryskowy dawki inicjującej	Common Rail firmy Bosch
Wtryskiwacz ON firmy Bosch	0986435 004 090
Układ wtryskowy CNG	IC
Wtryskiwacz gazu Bosch	F465 151 72
Ciśnienie wtrysku gazu	1 MPa

Silnik SB3.1 przystosowany do zasilania dwupaliwowego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1 Widok silnika badawczego SB3.1: wyróżniono układ zasilania

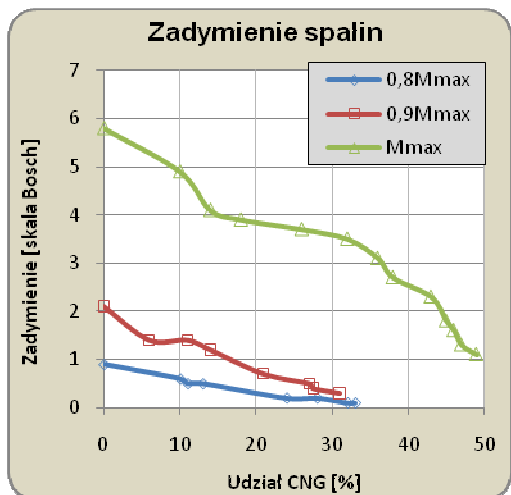
W celu przystosowania silnika do zasilania dwupaliwowego (olejem napędowym i CNG) dokonano w nim szeregu zmian. Zastosowano zasilanie gazem ziemnym za pomocą układu wtryskowego. Wtrysk gazu realizowany był przez dwa wtryskiwacze pod ciśnieniem maksymalnym 1 MPa, stosowane do zasilania silników trakcyjnych gazem ziemnym sprężonym CNG (m.in. w samochodzie Fiat Multipla). Wtryskiwacze były zamontowane w kolektorze dolotowym tuż przed głowicą. Dla zapewnienia prawidłowego wtrysku oleju napędowego silnik wyposażono w elektronicznie sterowany akumulatorowy układ wtrysku *Common Rail* produkcji firmy BOSCH. Układ *Common Rail* regulowano za pomocą sterownika KSSIP-1, parametry wtrysku gazu za pomocą sterownika KSSIP-3. Obydwa sterowniki wykonano w Katedrze Silników Spalinowych i Pojazdów ATH [6, 7]. W układzie dolotowym silnika zainstalowano przepływomierz turbinowy do pomiaru ilości zasysanego powietrza.

Dodatkowo wykonano adaptację głowicy silnika dla potrzeb indykowania ciśnień w komorze spalania urządzeniem INDIMETER 619 firmy AVL. W głowicy zamontowano adapter z niechłodzonym przetwornikiem ciśnienia GU13P firmy AVL. Na wale korbowym od strony koła zamachowego zamontowano nadajnik kąta obrotu wału, który daje informacje o zmianach kąta położenia wału korbowego z rozdzielczością 0,5°OWK. Przedstawione w publikacji badania wykonano dla prędkości obrotowej silnika wynoszącej 1400 obr/min i dla obciążenia silnika wynoszącego kolejno: 80%, 90% i 100% obciążenia maksymalnego. Ciśnienie wtrysku oleju napędowego wynosiło 70 MPa, przy czym zastosowano dzieloną dawkę wtrysku z podziałem sygnału sterującego 15% dla dawki pilotującej i 85% dla dawki głównej. Badania wykonano przy stałym kącie wyprzedzenia wtrysku 20° przed GMP.

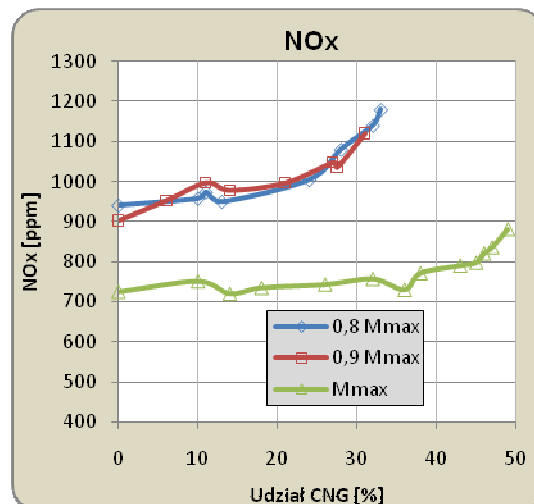
Udział gazu wynosił w zależności od obciążenia silnika od ok. 30% do 50%, dla przypadku pracy silnika w obszarze podwyższonego zadymienia. Przedstawione poniżej charakterystyki wykonano w funkcji udziału paliwa gazowego w stosunku do całkowitej dawki energii dostarczanej do silnika.

## 2. Analiza wyników badań

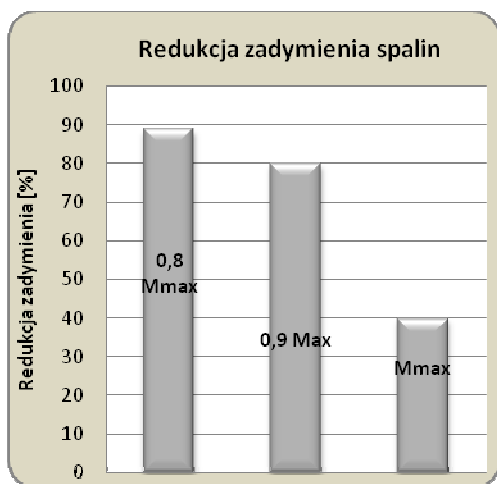
Na rys. 2÷6 przedstawiono zadymienie i toksyczność spalin silnika zasilanego dwupaliwowo. Zadymienie spalin mierzono za pomocą dymomierza filtracyjnego AVL typ 4090A0 o zakresie pomiarowym 0,0÷0,9 [skala BOSCH] i zmiennej skali błęd pomiaru. Pomiary wykonano dla trzech różnych obciążeń silnika wynoszących kolejno: 0,8M<sub>max</sub>, 0,9M<sub>max</sub> i M<sub>max</sub>, celowo wybranych w obszarze podwyższonego zadymienia silnika. Ponieważ wszystkie parametry regulacyjne silnika były takie jak przy zasilaniu samym olejem napędowym, przedstawione na rys. 2÷3 zmiany zadymienia spalin wynikają ze wzrostu udziału gazu ziemnego. Poziom zadymienia spalin maleje wraz ze wzrostem obciążenia silnika i zwiększaniem udziału gazu (rys. 2). Na rys. nr 3 przedstawiono stopień redukcji zadymienia spalin dla analizowanych obciążeń silnika i udziału CNG nieprzekraczającego 30% całości energii dostarczonej do silnika.



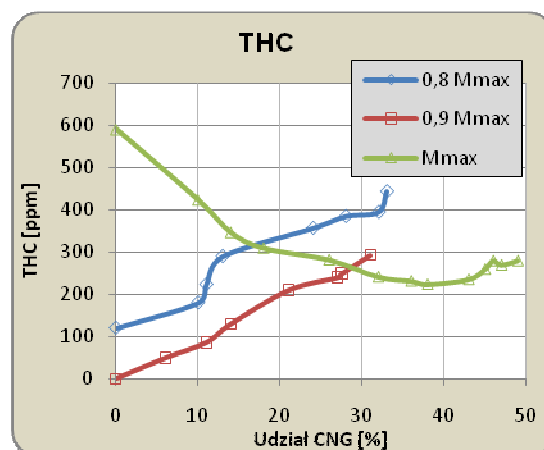
Rys.2. Zmiany zadymienia spalin dla różnych udziałów CNG



Rys.4. Zmiany stężenia tlenków azotu w spalinach dla różnych udziałów CNG



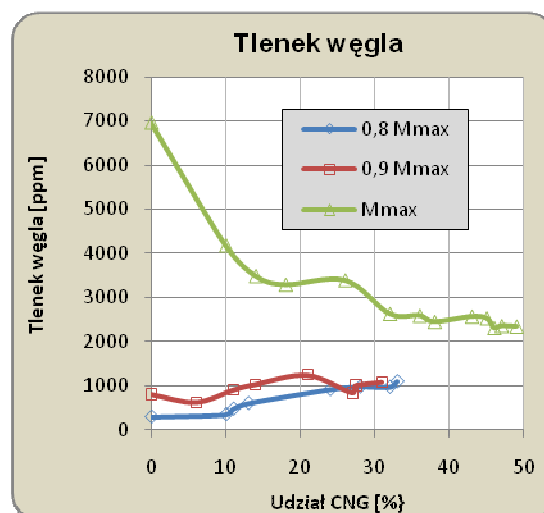
Rys.3. Stopień redukcji zadymienia spalin



Rys.5. Zmiany stężenia sumarycznych węglowodorów w spalinach dla różnych udziałów CNG

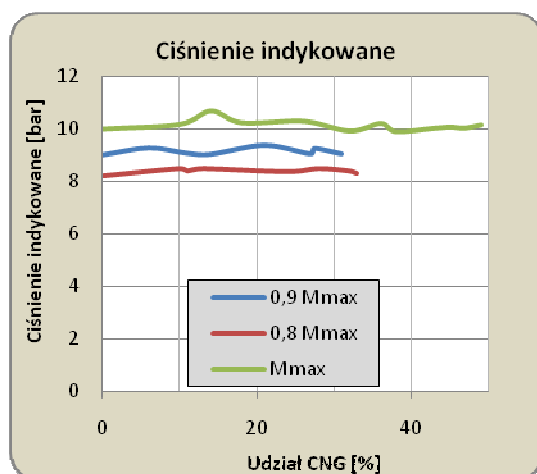
Na rys. 4 przedstawiono zmiany stężenia tlenków azotu. Dla udziału CNG nieprzekraczającego 20% wpływ gazu na emisję  $\text{NO}_x$  jest mało znaczący.

Zmiany stężenia tlenu węgla i węglowodorów pokazano na rys. 5 i 6. Charakter zmian jest odmienny w stosunku do  $\text{NO}_x$ . Stężenia THC i CO dla mniejszych obciążeń silnika wzrastają wraz z rosnącym udziałem gazu, natomiast dla obciążenia na granicy dymienia poziomy tej emisji maleją. Ma to zapewne związek ze znacznym zmniejszeniem wartości współczynnika nadmiaru powietrza.

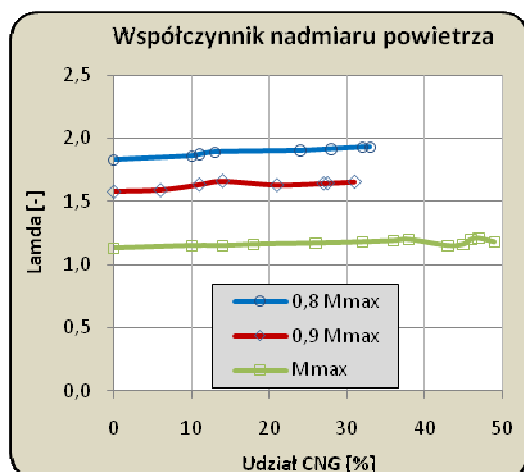


Rys.6. Zmiany stężenia tlenu węgla w spalinach dla różnych udziałów CNG

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów ciśnień obliczono parametry procesu spalania. W pracy analizowano wybrane z nich, takie jak: współczynnik nadmiaru powietrza, ciśnienie indykowane, ciśnienie maksymalne, maksymalną szybkość wydzielania ciepła, długość procesu spalania, sprawność ogólną silnika. Na rys. 7 i 8 przedstawiono przebiegi zmian ciśnienia indykowanego i współczynnika nadmiaru powietrza w funkcji udziału CNG dla stałych obciążeń silnika. Z rys. 7 i 8 wynika nieznaczny wpływ udziału gazu na wartości analizowanych parametrów. Maksymalne obciążenie silnika uzyskano przy znacznym zmniejszeniu współczynnika nadmiaru powietrza (świadomie), co miało wpływ na istotne zmniejszenie sprawności silnika (rys. 9).



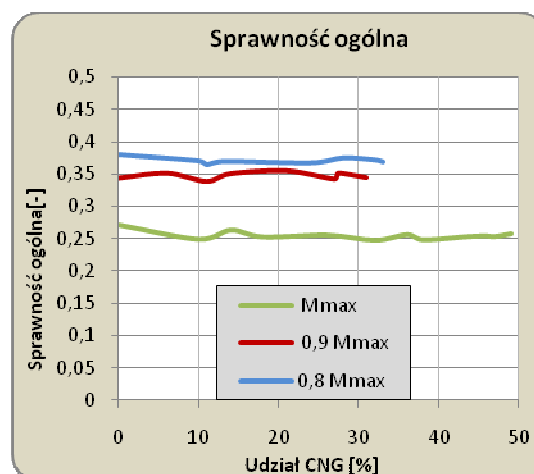
Rys. 7. Przebiegi wartości średniego ciśnienia indykowanego dla różnych udziałów CNG



Rys. 8. Wartości współczynnika nadmiaru powietrza dla zmiennych udziałów CNG

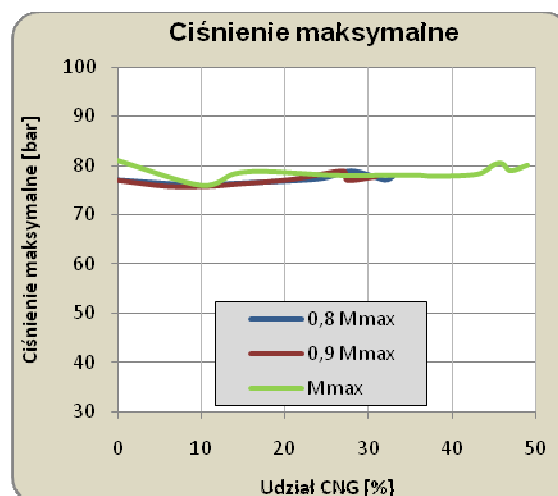
Na rys. 9 przedstawiono zmiany sprawności ogólnej silnika w funkcji zmian udziału gazu w dawce energii dostarczanej do silnika. Widoczne zmniejszenie sprawności silnika pracującego przy maksymalnym obciążeniu wynika ze znacznego wzbogacenia mieszaniny, co pokazano na rys. 8. W

rzeczywistych warunkach pracy silnika należy zachować średni skład mieszaniny palnej na poziomie jak przy zasilaniu tradycyjnym lub nieznacznie obniżyć parametry pracy silnika zasilanego dwupaliwowo. Zmniejszanie współczynnika nadmiaru powietrza prowadzi z reguły do zwiększenia zadymienia spalin. Zakres pracy przy podwyższonym zadymieniu spalin należy traktować jako nietypowy dla pracy silnika o zapłonie samoczynnym.



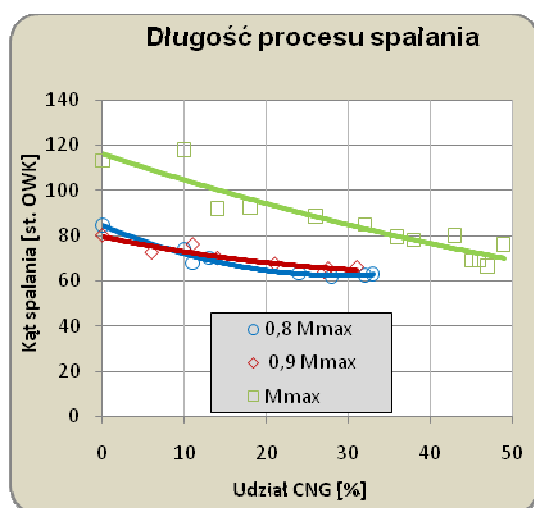
Rys. 9. Sprawność ogólna silnika dla zmiennych udziałów CNG

Przedstawione na rys. 10 zmiany ciśnienia maksymalnego w cylindrze są niewielkie i wynikają również ze stosunkowo małego udziału gazu w całości energii cyklu. Jak wykazały wcześniejsze badania, przy dużych dawkach inicjujących oleju napędowego, o maksymalnym ciśnieniu w cylindrze decyduje przebieg spalania oleju napędowego, zachodzący wcześniej [8, 9]. Niewielkie zmiany ciśnienia maksymalnego są korzystne dla omawianego sposobu zasilania silnika.



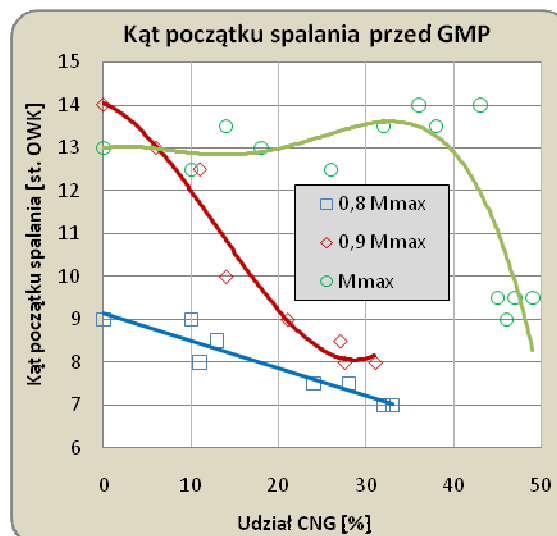
Rys. 10. zmiany ciśnienia maksymalnego w cylindrze dla różnych udziałów CNG

Czas spalania, wyrażony w jednostkach kątowych od początku do zakończenia procesu, wyraźnie ulega skróceniu wraz z rosnącym udziałem gazu w mieszaninie palnej (rys. 11). Wynika to ze zwiększenia średniej szybkości spalania mieszaniny gaz-powietrze powodowanym jej wzbogaceniem [9, 11, 14]. Jak wykazały wcześniejsze badania, całkowity kąt spalania w silnikach dwupaliwowych jest determinowany przez czas spalania mieszaniny gaz-powietrze. Jest on silnie uzależniony od jej składu i maleje wraz ze wzrostem stężenia gazu w mieszaninie [9, 11]. Proces spalania mieszaniny gazowej odbywa się z pewnym opóźnieniem w stosunku do spalania dawki inicjującej (po czasie tzw. indukcji) a jej największa dynamika zachodzi po objęciu przez płomień dużej objętości komory spalania. Proces spalania oleju napędowego rozpoczyna się jako pierwszy i trwa bardzo krótko, głównie w fazie kinetycznego spalania, szczególnie przy małych dawkach inicjujących [9]. Opóźnienie maksymalnej dynamiki spalania gazu w stosunku do oleju napędowego jest zależne od składu mieszaniny gaz-powietrze, zasięgu strugi oleju napędowego i parametrów geometrycznych komory spalania.



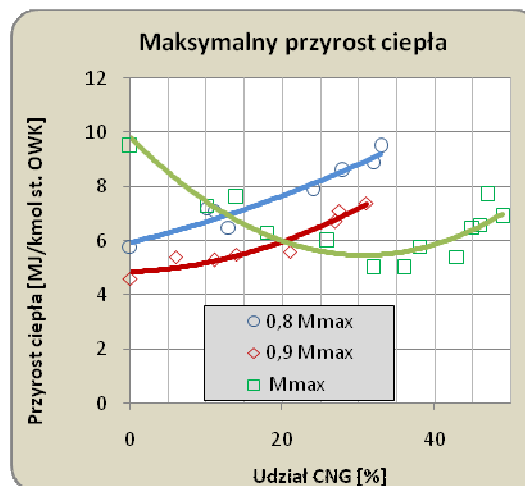
Rys. 11. Zmiany całkowitego kąta spalania dla różnych udziałów CNG

Informację o zmianach opóźnienia samozapłonu dawki inicjującej można uzyskać analizując kąt początku spalania. Należy zaznaczyć, że w warunkach badań spalanie rozpoczynało się zawsze przed GMP. Przy stałym kącie wyprzedzenia wtrysku, zmiany kąta początku spalania wskazują na odpowiednie zmiany opóźnienia samozapłonu. Wraz z rosnącym udziałem gazu w paliwie opóźnienie samozapłonu zwiększa się (rys. 12). Charakter zmian opóźnienia jest nieco inny dla obciążenia maksymalnego występującego dla małej wartości  $\lambda$ , gdzie wzrost opóźnienia występuje dopiero dla większych udziałów CNG.



Rys.12. Zmiany kąta początku spalania dla różnych udziałów CNG

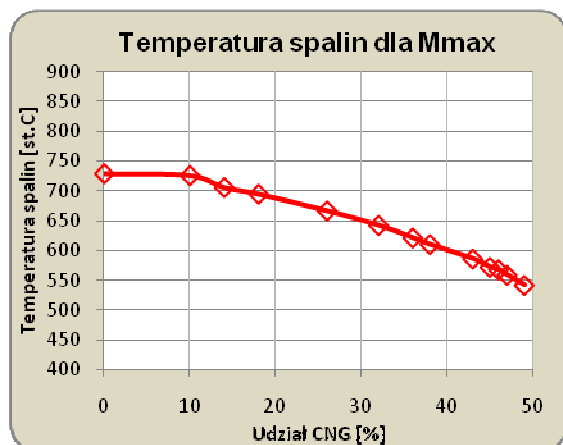
Skrócenie czasu trwania procesu spalania i zwiększanie kąta opóźnienia samozapłonu prowadzi do intensyfikacji wydzielania ciepła w zakresie większych obciążeń silnika (obciążenie 0,8 i 0,9 $M_{omax}$ ; rys. 13). Odmienny przebieg wykazuje charakterystyka dla maksymalnego obciążenia, gdzie szybkość wydzielania ciepła początkowo maleje a następnie rośnie. Może to być związane z zakłóceniami samozapłonu i spalania z powodu nadmiernego wzbogacenia mieszaniny palnej.



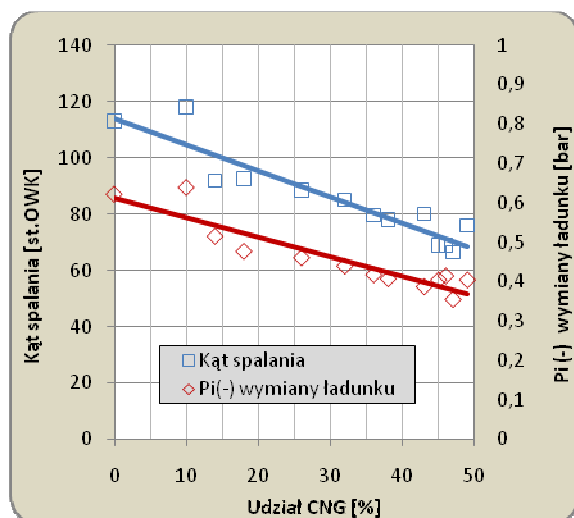
Rys. 13. Zmiany maksymalnego przyrostu ciepła dla różnych udziałów CNG

Na rys. 14 przedstawiono zmiany temperatury spalin mierzone w kolektorze bezpośrednio za zaworem wylotowym. Przedstawiona charakterystyka dotyczy maksymalnego obciążenia silnika pracującego w obszarze podwyższonego zadymienia. Wi-

doczyn jest wyraźny spadek temperatury spalin wraz z wzrastającym udziałem CNG. Taki charakter zmian temperatury związany jest ze skróceniem procesu spalania i jest również silnie skorelowany ze średnim ciśnieniem indykowanym pętli wymiany ładunku (rys. 15). Pętla wymiany ładunku, zależna od długości procesu spalania, decyduje o pracy traconej w obiegu, pośrednio jest również miarą ciepła traconego przez wypływ spalin.



Rys. 14. Zmiany temperatury spalin dla maksymalnego obciążenia silnika  $M_{max}$  w funkcji udziału CNG



Rys. 15. Przebiegi średniego ciśnienia indykowanego pętli wymiany ładunku i całkowitego kąta spalania dla obciążenia maksymalnego silnika i dla zmiennych udziałów CNG

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Celem przeprowadzonych badań była ocena możliwości ograniczenia zadymienia spalin w wolno-ssącym silniku o zapłonie samoczynnym, za pomocą niewielkiego dodatku paliwa gazowego. Przeprowadzone pomiary potwierdziły potencjalne możliwości ograniczenia zadymienia spalin i co bardzo prawdopodobne - cząstek stałych w spalinach przez zasilanie silnika olejem napędowym z

niewielkim dodatkiem CNG (udział energetyczny do 30%). Wykonane analizy w obszarze największego zadymienia silnika dowodzą, że dodatek CNG w zakresie do 30% nie powoduje istotnych zmian w procesie spalania, które wpływają na sprawność silnika lub nadmierny wzrost obciążenia cieplnego i ciśnienia maksymalnego w cylindrze. Dopiero znacznie większe udziały CNG (do 90%) powodują istotne zmiany w procesie spalania, co sygnalizowano w pracach [8, 9]. Mogą one w doładowanych silnikach zasilanych dwupaliwowo wymagać weryfikacji wymiarów układu korbowego.

Potencjalne korzyści z zastosowania niewielkiego dodatku CNG i dwupaliwowego zasilania silnika o zapłonie samoczynnym są następujące:

- korzyści ekologiczne wynikające z ograniczenia zadymienia spalin i emisji cząstek stałych,
- korzyści ekonomiczne, bowiem koszt  $1\text{m}^3$  CNG jest ok. 3-krotnie niższy w stosunku do odpowiadającemu mu energetycznie  $1\text{dm}^3$  oleju napędowego, co powinno być atrakcyjne dla użytkowników,
- z uwagi na koszty instalacji CNG w pojeździe samochodowym, które są porównywalne z instalacją LPG, możliwe jest zastosowanie takiego sposobu zasilania, nie tylko w transporcie ciężarowym i komunikacji publicznej, ale również w samochodach osobowych, w tym starszych, które z uwagi na trwałość silników, będą jeszcze długo eksploatowane,
- zwiększenie trwałości filtrów cząstek stałych zwłaszcza dla samochodów eksploatowanych w warunkach jazdy miejskiej oraz ułatwiona regeneracja filtrów za pomocą kontroli procesu spalania drogą zmian parametrów wtrysku oleju napędowego i CNG.

Zastosowanie nowoczesnej elektronicznej aparatury zasilającej daje nowe możliwości sterowania parametrami pracy silnika zasilanego dwupaliwowo, również w stanach nieustalonych, gdzie szczególnie istotna jest możliwość ograniczenia zadymienia spalin i emisji składników toksycznych. Uzyskane wyniki uzasadniają potrzebę przeprowadzenia badań weryfikacyjnych na nowoczesnym doładowanym silniku o zapłonie samoczynnym, zasilanym dodatkowo wtryskiem CNG. W takich badaniach powinna być uwzględniona optymalizacja kąta wyprzedzenia wtrysku dawki oleju napędowego oraz sterowanie dławieniem dolotu powietrza, zależnie od prędkości obrotowej, obciążenia i składu mieszaniny gaz-powietrze.

---

## Bibliography/Literatura

1. Baczewski K., Kałdoński T.: „Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym”. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2004.
2. Chen Z., Konno M., Goto S.: „Study on homogenous premixed charge CI engine fueled with LPG”. JSAE Review 22, 2001.
3. Merkisz J., Pielecha I.: „Alternatywne paliwa i układy napędowe pojazdów”. Wydaw. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
4. Myszkowski S.: „Gaz ziemny dla silników”, AutoMoto Serwis, 2004.
5. Stangmaier R.H., Ryan III T.W., Souder J.S.: „HCCI Operation of a Dual-Fuel Natural Gas Engine for Improved Fuel Efficiency and Ultra-Low NOX Emissions at Low to Moderate Engine Loads”. SAE Paper 2001-01-1897, 2001.
6. Larisch J., Knepfel T., Stelmasiak Z., Pietrasina W.: “Badawczy sterownik układów wtrysku Common Rail – KSSiP”, International Congress of Combustion Engines “The Development of Combustion Engines”, Szczyrk, September 25-28, 2005.
7. Stelmasiak Z., Larisch J., Gilowski T., Marcin Matyjasik.: „Wykorzystanie układu COMMON RAIL i elektronicznego wtrysku gazu do poprawy parametrów pracy dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego gazem ziemnym”. - Zeszyty Naukowe. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej nr 26, 2006.
8. Stelmasiak Z.: „Analiza systemów spalania paliw gazowych ze szczególnym uwzględnieniem układów dwupaliwowych”. Bielsko-Biała, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej Filia w Bielsku-Białej, nr 58, 2000.
9. Stelmasiak Z.: „Studium procesu spalania gazu w dwupaliwowym silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym gazem ziemnym i olejem napędowym”. Wyd. Akademii Techniczno Humanistycznej, nr 5/2003.
10. Wołoszyn R.: „Gaz ziemny jako paliwo do napędu pojazdów”. Eksploatacja i niezawodność, nr3, 2003.
11. Stelmasiak Z., Larisch J.: “Some aspects of control charge quality in a dual fuel diesel engine fuelled with CNG and Diesel oil”. - Journal of KONES : Internal Combustion Engines Vol. 11, No.3-4, 2004.
12. Stelmasiak Z., Larisch J., Gilowski T.: „Możliwości sterowania dawką inicjującą oleju napędowego w dwupaliwowych silnikach ZS wyposażonych w system Common Rail” International Congress of Combustion Engines “The Development of Combustion Engines”, Szczyrk, September 25-28, 2005.
13. Zdzisław Stelmasiak, Jerzy Larisch „Optymalizacja kąta wyprzedzenia wtrysku w dwupaliwowym silniku o ZS z elektronicznym układem wtrysku dawki inicjującej COMMON RAIL”, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 2006 nr 162 Mechanika z. 26, 2006.
14. Stelmasiak Z., Larisch J.: „Możliwości poprawy składu mieszaniny gazowej przez dławienie powietrza przy częściowych obciążeniach silnika dwupaliwowego”. Archiwum Motoryzacji nr 1/2007.

Mr Jerzy Larisch, DSc., – Adiunkt in the Faculty of Mechanical Engineering at University of Bielsko-Biala.

Dr inż. Jerzy Larisch – adiunkt na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej.

Mr Tomasz Gilowski, Mgr Eng. – Assistant in the Faculty of Mechanical Engineering at University of Bielsko-Biala

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-Biala

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

