

## EMISSION REDUCTION POSSIBILITY IN ENGINES FUELLED WITH NATURAL GAS

Andrzej Żółtowski

Instytut Transportu Samochodowego  
03-301 Warszawa, ul. Jagiellońska 80,  
e-mail: andzol@its.waw.pl

fax: (22) 8110906, tel. (22)8113231 wew. 195

### Abstract

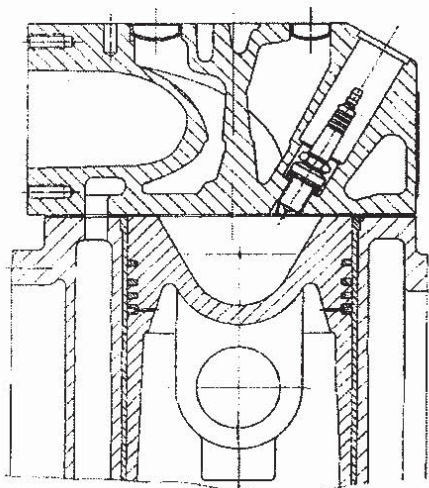
In the paper described theoretical possibilities of emission reduction as a result of using natural gas as an engine fuel. The problem discussed using test results of a diesel engine adapted to CNG and engine MAN E 2866 LUH 01 as well as Honda Civic GX. The article proved that properly constructed gaseous fuel system can reduce exhaust emission.

## MOŻLIWOŚCI OGRANICZANIA SZKODLIWEJ EMISJI W SILNIKACH ZASILANYCH GAZEM ZIEMNYM

### Streszczenie

W referacie przedstawiono teoretyczne możliwości obniżenia emisji w silnikach jako efekt zastosowania gazu ziemnego jako paliwa. Przedstawiono wyniki badań silnika ZS adaptowanego do zasilania CNG, jak również na przykładzie samochodu HONDA Civic oraz silnika MAN przedstawiono praktyczne możliwości obniżenia emisji, spowodowane stosowaniem CNG jako paliwa.

### 1. Wstęp



Rys. 1. Silnik MAN D2356-HM6U zasilany CNG

Fig. 1. Engine MAN D2356-HM6U fuelled with CNG

Ciągłe zaostrzanie przepisów dotyczących dopuszczalnej emisji toksycznych składników spalin oraz presja społeczna na stosowanie proekologicznych źródeł napędu w trosce o zapobieganie degradacji środowiska naturalnego wymusza poszukiwanie nowych rozwiązań technicznych, spełniających te coraz surowsze wymagania. Prace te idą dwutorowo: jednym odgałęzieniem tego nurtu jest podwyższanie sprawności urządzeń oczyszczających spaliny i środki techniczne związane z ograniczeniem emisji w surowych spalinach, zaś drugim nurtem jest próba zastosowania ogniw paliwowych i paliw ekologicznych (wodór). Nim na dobre upowszechni się stosowanie wodoru jako paliwa, co jest uwarunkowane opanowaniem tanich technologii jego wytwarzania, pośrednim etapem na drodze do jego wdrożenia jest upowszechnienie zasilania silników metanem.

Metan to jeden z powszedniej występujących na świecie w sposób naturalny węglowodorów, charakteryzujących się względnie wysoką zawartością wodoru w cząsteczce. Dzięki temu jako efekt stosowania metanu otrzymujemy namiastkę skutków, z jakimi mielibyśmy do

czynienia w przypadku wodoru. W porównaniu z benzyną czy olejem napędowym teoretycznie niższa emisja CO, NMHC, PM, aldehydów, kancerogenów, CO<sub>2</sub> czyni z tego paliwa bardzo atrakcyjny sposób obniżenia emisji.

## 2. Gaz ziemny paliwem zmniejszającym szkodliwą emisję

W silniku wyposażonym w reaktor katalityczny potrójnego działania na wartość szkodliwej emisji wpływa przede wszystkim wartość współczynnika nadmiaru powietrza i dlatego wartość emisji z silnika czy pojazdu jest wypadkową szeregu czynników. Pomimo że stosowanie gazu ziemnego powinno teoretycznie powodować mniejszą emisję zanieczyszczeń, w

Tablica 1. Podstawowe dane techniczne silnika MAN 2356-HM6U przed adaptacją  
Table 1. Main technical data of engine MAN 2356-HM6U before adoption

skok tłoka [mm]	150
średnica cylindra [mm]	121
pojemność skokowa [dm <sup>3</sup> ]	10,3
liczba cylindrów	6
stopień sprężania	17

praktyce dosyć trudno jest to udowodnić. Aby dowieść w tym względzie zalet gazu ziemnego przeprowadzono eksperyment z wykorzystaniem silnika MAN D2356-HM6U. Był to silnik adaptowany z silnika ZS zasilanego olejem napędowym, stosowany do napędu autobusów Ikarus. Podstawowe dane techniczne tego silnika przedstawiono w tablicy 1. Adaptacja

silnika do zasilania CNG polegała między innymi na zmniejszeniu stopnia sprężania do wartości 11,5, umieszczenia świecy zapłonowej w gnieździe wtryskiwacza, zastosowaniu w układzie wylotowym silnika reaktora katalitycznego potrójnego działania w celu obniżenia emisji zanieczyszczeń gazowych.

Na rys. 3 pokazano charakterystykę regulacyjną silnika w funkcji składu mieszanki paliwowo-powietrznej. Przedstawia ona zmianę emisji jednostkowych mierzonych za i przed reaktorem katalitycznym. Z powodu ogólnie znanych właściwości trójfunkcyjnych reaktorów katalitycznych, silnik wyposażony w taki reaktor charakteryzuje się najniższą emisją w okolicy składu stechiometrycznego ( $\lambda=1,00$ ). Przy tym składzie mieszanki średnie emisje jednostkowe w badanym silniku osiągnęły wartości: CO – 1g/kWh, THC – 0,7g/kWh, NO<sub>x</sub> – 2 g/kWh.

W tablicy 2 zestawiono wartości dopuszczalne emisji według regulaminu 49, natomiast w tablicy 3 przedstawiono emisje badanego silnika wyznaczone zgodnie z regulaminem 49.

Tablica 2. Wartości dopuszczalne emisji wg regulaminu 49 ECE  
Table 2. Emission limits according to regulation 49 ECE

Rodzaj cyklu	Cykl ESC (13-o fazowy)			Cykl ETC		
	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 3	Euro 4	Euro 5
Rok wprowadzenia	2000	2005	2008	2000	2005	2008
CO [g/kWh]	2,1	1,5	1,5	5,45	4,0	4,0
THC [g/kWh]	0,66	0,46	0,46	0,78	0,55	0,55
NO <sub>x</sub> [g/kWh]	5,0	3,5	2,0	5,0	3,5	2,0

Do tych badań silnik został wyposażony w aparaturę gazową II generacji firmy Landi Renzo, w skład której wchodził między innymi reduktor gazowy, mieszalnik oraz zawór dawkujący gaz sterowany silnikiem krokowym na podstawie sygnałów z sondy lambda. Wyniki pomiarów emisji uzupełniono o wartości stopnia oczyszczenia spalin, wyrażające procent, o jaki została zmniejszona w reaktorze katalitycznym emisja poszczególnych składników spalin.

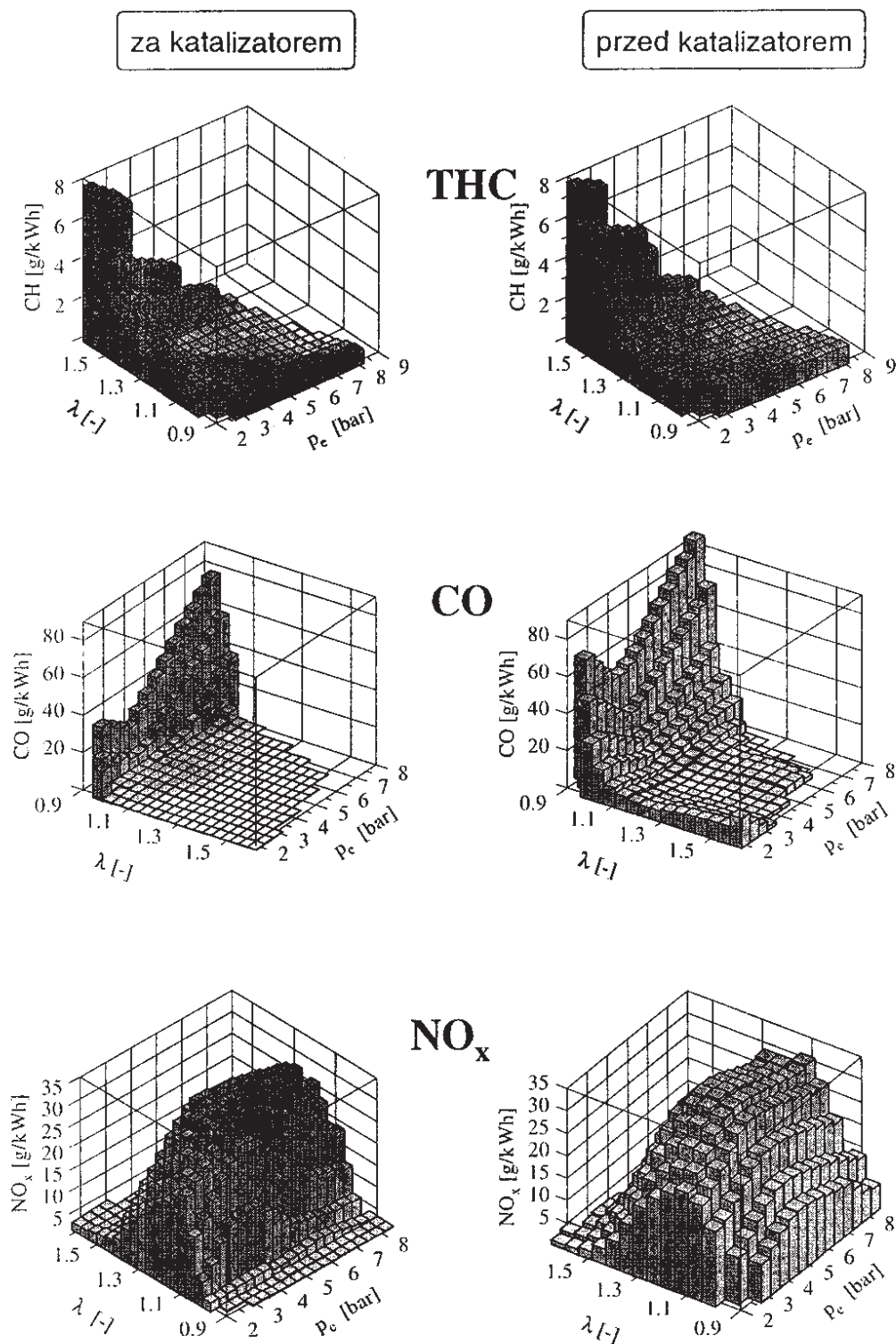
Tablica 3. Emisje jednostkowe z silnika MAN 2356-HM6U wg Regulaminu 49/02 zasilanego CNG

Table 3. Emission mass calculated according to regulation 49 ECE from engine MAN 2356-HM6U fuelled with CNG

	przed reaktorem katalitycznym [g/kWh]	za reaktorem katalitycznym [g/kWh]	stopień oczyszczenia spalin [%]
CO	11,7	0,31	97
THC	0,91	0,11	88
NO <sub>x</sub>	17,9	5,76	68

Z danych zawartych w tabelicy 3 wynika, że w badanym silniku stopień redukcji  $\text{NO}_x$  nie był zadowalający. Winę za to ponosi układ dawkowania paliwa, który nie był w stanie zapewnić optymalnego składu mieszanki paliwowo-powietrznej.

Aby przekonać się na ile możliwa jest redukcja emisji  $\text{NO}_x$  wykonano następujący eksperyment.



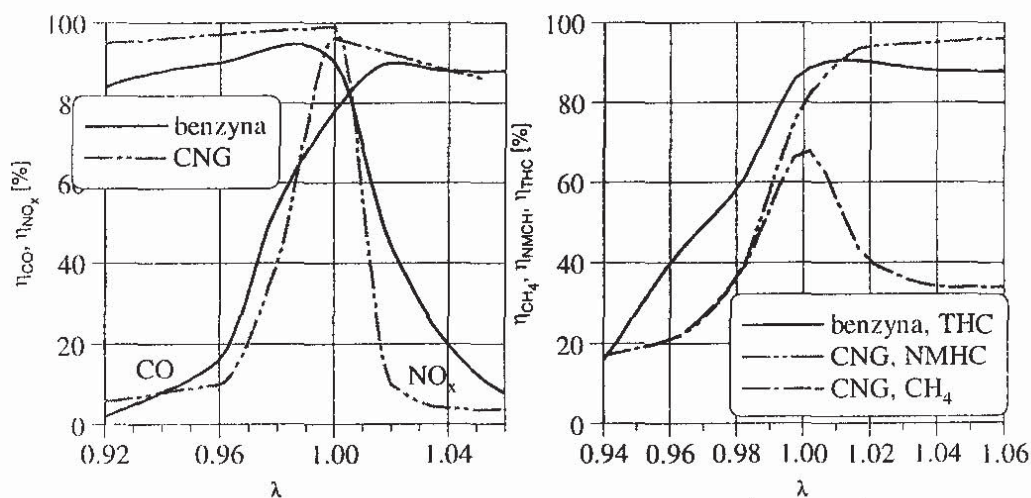
Rys. 3. Przebiegi emisji jednostkowych CO, CH i  $\text{NO}_x$  w silniku MAN 2856-HM56 zasilanym gazem ziemnym;  $n=1200$  obr/min  
 Fig. 3. Emission mass of CO, CH i  $\text{NO}_x$  from engine MAN 2856-HM56 fuelled with CNG at 1200 rpm

Podczas każdej z trzynastu faz cyklu badawczego dokonano manualnie korekcji składu mieszanki paliwowo-powietrznej w ten sposób, aby zminimalizować emisję  $\text{NO}_x$  przy jednoczesnym utrzymaniu emisji CO i THC na takim poziomie, aby nie przekroczyć wartości dopuszczalnych. Wyniki tak wykonanej optymalizacji przedstawiono w tabelicy 4.

Tablica 4. Zoptymalizowana emisja z silnika MAN 2356-HM6U zasilanego CNG  
 Table 4. Optimised emission from engine MAN 2356-HM6U fuelled with CNG

	przed reaktorem katalitycznym [g/kWh]	za reaktorem katalitycznym [g/kWh]	stopień oczyszczenia spalin [%]
CO	7,63	1,03	86
THC	0,58	0,14	76
$\text{NO}_x$	13,5	0,17	99

Porównując wartości przedstawione w tablicach 3 i 4 widzimy, że przy zoptymalizowanym składzie mieszanki paliwowo-powietrznej można osiągnąć 99% redukcji  $\text{NO}_x$  w spalinach, uzyskując emisję jednostkową tego składnika na poziomie 0,17 g/kWh, to jest 3% wartości dopuszczalnej Euro 3. Towarzyszy temu emisja CO na poziomie 51% limitu Euro 2 i THC na poziomie 23 %. W przypadku węglowodorów pamiętać należy, że co najmniej 80% emisji THC w silniku zasilanym gazem ziemnym stanowi metan. W tej sytuacji emisja NMHC w badanym silniku nie przekroczyłaby 5%. Liczby te pokazują jak niską emisją może charakteryzować się silnik zasilany gazem ziemnym.



Rys.4. Porównanie współczynników oczyszczenia spalin reaktora katalitycznego potrójnego działania w silniku zasilanym benzyną i CNG

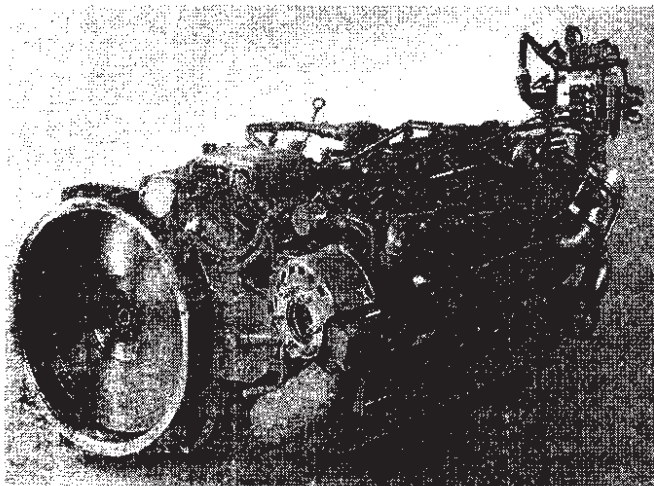
Fig. 4. Comparison of exhaust rectification coefficients for 3-way catalyct reactor in an engine fuelled with CNG [1]

Należy podkreślić, że oprócz precyzyjnej regulacji składu mieszanki w silniku tym nie wykonano żadnych dodatkowych przedsięwzięć mających na celu obniżenie emisji. Opóźnienie zapłonu, zmniejszenie stopnia sprężania, recyrkulacja spalin to czynniki, którymi dodatkowo można wpływać na zmniejszenie emisji. Porównując wartości emisji oraz stopnie oczyszczenia spalin (tablice 3 i 4) widzimy, że optymalna regulacja z punktu widzenia  $\text{NO}_x$  polegała na lekkim wzbogaceniu mieszanki. Uzyskano przez to pogorszenie stopnia oczyszczenia spalin dla CO i THC, średnio o 12%.

Na rys. 4 przedstawiono skuteczność działania reaktora katalitycznego. Próbuąc odnaleźć skład mieszanki odpowiadający wartościom współczynników oczyszczenia spalin przed-

stawionych w tablicach 3 i 4 widzimy, że w przypadku tablicy 3 średni skład mieszanki wynosił  $\lambda=1,01$ , zaś w przypadku tablicy 4 –  $\lambda=0,99$ . Skoro z powodu nadmiernej emisji  $\text{NO}_x$  skład  $\lambda=1,01$  jest już nieodpowiedni, to fakt ten dowodzi jak wielkie wymagania muszą być stawiane silnikowi zasilanemu gazem ziemnym w stosunku do precyzji dawkowania paliwa.

### 3. Przykłady silników i samochodów o niskiej emisji



Rys.5. Silnik MAN E 2866 LUH 01 zasilany CNG  
Fig.5. Engine MAN E 2866 LUH 01 fuelled with CNG

Podczas badań homologacyjnych według regulaminu 49 ECE silników zasilanych CNG odtwarzanym cyklem badawczym jest cykl ETC. Dynamiczny charakter tego cyklu (praca w warunkach nieustalonych, hamowanie silnikiem) w trosce o minimalizację emisji zmusza konstruktorów do zachowania szczególnej dbałości o skład mieszanki paliwowo-powietrznej podczas pracy silnika. W tablicy 5 przedstawiono emisje jednostkowe w cyklu ETC z silnika typu MAN E 2866 LUH 01 (rys. 5) zasilanego CNG. Jest to jeden z lepszych silników pod względem emisji. Warto zauważyć, że limity Euro 4 spełnia on z olbrzymim zapasem, wynoszącym odpowiednio: CO – 97%, NMHC – 100% (całkowity brak emisji węglowodorów innych niż metan),  $\text{CH}_4$  – 98%,  $\text{NO}_x$  – 82% i PM – 77%. Silnik ten znajduje zastosowanie między innymi w autobusach Jelcz M125M/4. Budowa tego autobusu została dofinansowana w ramach projektu celowego, w którego realizacji uczestniczył autor. Niebawem kilka takich autobusów będzie eksploatowanych w Rzeszowie.

Podobnie jak silnik MAN E 2866 LUH 01 wśród silników przeznaczonych do napędu autobusów, tak Honda Civic GX wśród samochodów osobowych stanowi przykład rozwiązania technicznego wyprzedzającego wyraźnie konkurencję pod względem emisji. Producent reklamuje Hondę Civic GX zasilaną CNG jako samochód charakteryzujący się najniższą emisją na świecie. W tablicy 6 przedstawiono wartości emisji tego pojazdu. Z przedstawionych danych wynika, że pojazd ten w przypadku CO ma jeszcze 77% zapasu do osiągnięcia wartości dopuszczalnej Euro 4, w przypadku THC – 20%, a dla  $\text{NO}_x$  – 88%.

W tablicy 7 porównano emisję wersji benzynowej i gazowej Hondy Civic GX. Ten sam egzemplarz silnika w wersji zasilanej CNG odznaczał się (tablica 7) niższą emisją NMHC o 96%, CO o 90%,  $\text{NO}_x$  o 69%,  $\text{CO}_2$  o 26% i BTX (benzen, toluen, ksylen) o 97%.

Podczas badań homologacyjnych według regulaminu 49 ECE silników zasilanych CNG odtwarzanym cyklem badawczym jest cykl ETC. Dynamiczny charakter tego cyklu (praca w warunkach nieustalonych, hamowanie silnikiem) w trosce o minimalizację emisji zmusza konstruktorów do zachowania szczególnej dbałości o skład mieszanki paliwowo-powietrznej podczas pracy silnika. W tablicy 5 przedstawiono emisje jednostkowe w cyklu ETC z silnika typu MAN E 2866 LUH 01 (rys. 5) zasilanego CNG. Jest to jeden z lepszych silników pod względem emisji. Warto zauważyć, że limity Euro 4 spełnia on z olbrzymim zapasem, wynoszącym odpowiednio: CO – 97%, NMHC – 100% (całkowity brak emisji węglowodorów innych niż metan),  $\text{CH}_4$  – 98%,  $\text{NO}_x$  – 82% i PM – 77%. Silnik ten znajduje zastosowanie między innymi w autobusach Jelcz M125M/4. Budowa tego autobusu została dofinansowana w ramach projektu celowego, w którego realizacji uczestniczył autor. Niebawem kilka takich autobusów będzie eksploatowanych w Rzeszowie.

Tablica 5. Emisje jednostkowe w cyklu ETC silnika MAN E 2866 DUH 03 zasilanego CNG

Table 5. Emission in ETC cycle from engine MAN E 2866 DUH 03 fuelled with CNG [2]

Składnik spalin	Zmierzona emisja [g/kWh]	Wartości dopuszczalne EURO 5
CO	0,12	4,0
NMHC	0,0	0,55
$\text{CH}_4$	0,02	1,1
$\text{NO}_x$	0,36	2,0
PM	0,007	0,03

Tablica 6. Emisja wyznaczona wg regulaminu 83 ECE  
Table 6. Emission measured according to regulation 83 ECE [3]

	CO [g/km]	THC [g/km]	$\text{NO}_x$ [g/km]
Honda Civic GX	0,23	0,08	0,01
Wartości dopuszczalne Euro 4	1,0	0,1	0,08

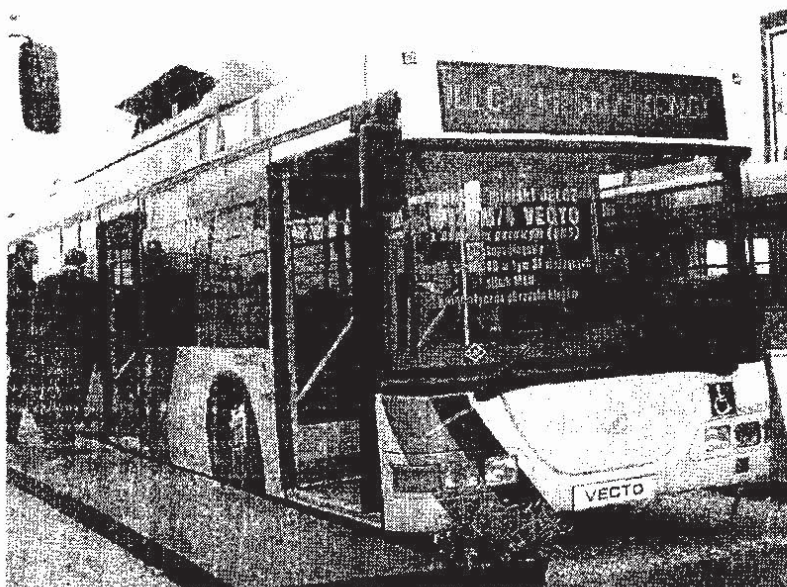
Tablica 7. Porównanie emisji samochodu Honda Civic GX w cyklu FTP-75 podczas zasilania benzyną i CNG

Table 7. Emission comparison in FTP-75 cycle of gasoline and CNG Honda Civic GX version [4]

	NMHC [g/milę]	CO [g/milę]	NO <sub>x</sub> [g/milę]	CO <sub>2</sub> [g/milę]
CNG	0,003	0,16	0,02	219,2
benzyna	0,079	1,595	0,065	295,7

Należy zwrócić uwagę, że jak dotychczas europejskie przepisy nie dzielą emitowanych z pojazdów węglowodorów na metan i węglowodory inne niż metan (NMHC), stąd też pod względem zmniejszenia emisji THC pojazdy zasilane gazem ziemnym nie mogą się korzystnie zaprezentować. Korzystniejsza pod tym względem jest sytuacja wśród pojazdów *heavy duty*, gdzie przepisy rozróżniają skład emitowanych węglowodorów.

Podany w tablicy 7 przykład ilustruje dobitnie, jak w zoptymalizowanym silniku zasilanym gazem ziemnym można znacząco ograniczyć emisję zanieczyszczeń gazowych. Ażeby osiągnąć tak obiecujące wyniki trzeba było opracować nową koncepcję układu wydechowego oraz elementów odpowiedzialnych za precyzyjne dawkowanie paliwa. Między innymi okazało się, że większe stężenia wodoru w spalinach silnika zasilanego CNG miało wpływ na nieprawidłowe działanie sondy lambda.



Rys. 6. Autobus miejski Jelcz M125M/4 zasilany CNG  
Fig. 6. City bus Jelcz M125M/4 fuelled with CNG

W tablicy 8 przedstawiono uśrednione - dla poszczególnych rodzajów jazdy - wartości współczynnika nadmiaru powietrza samochodu Honda Civic GX podczas odtwarzania cyklu jezdowego na hamowni podwoziowej. Biorąc pod uwagę dynamiczny charakter cyklu FTP-75, pomierzone odchylenie standardowe przebiegu zmian współczynnika nadmiaru powietrza na poziomie bliskim 1% należy uznać za dobry rezultat i wartość ta powinna stanowić wskazówkę dla

konstruktorów silników zasilanych gazem ziemnym. Rzeczą charakterystyczną jest, że odchylenia standardowe współczynnika nadmiaru powietrza w przypadku zasilania badanego silnika gazem ziemnym są niższe niż w przypadku zasilania benzyną.

Tablica 8. Wartość średnia oraz odchylenie standardowe współczynnika nadmiaru powietrza w samochodzie Honda Civic zasilanym CNG podczas odtwarzania cyklu FTP-75

Table 8. Average value and standard deviation of air-fuel ratio in Honda Civic fuelled with CNG in FTP-75 cycle [5]

Rodzaj jazdy	Przyspieszanie	Stała prędkość	Hamowanie	Bieg jałowy
Wartość średnia $\lambda$	1,002	1,001	0,999	0,997
Odchylenie standardowe	1,08%	1,16%	1,25%	0,91%

#### 4. Wnioski

Zastosowanie gazu ziemnego do zasilania silników spalinowych może stać się czynnikiem obniżającym emisję toksycznych składników spalin. Warunkiem osiągnięcia i wykorzystania pełni tych możliwości jest zapewnienie prawidłowej regulacji silnika.

#### Literatura

- [1] M. Ferrera, R. Rinolfi i inni: "*Development of CNG Environmentally Friendly Vehicles*", 23rd International Scientific Conference on Combustion Engines KONES'97, September 16-19, 1997 Bielsko-Biała.
- [2] Jan Sas: "*Dlaczego sprężony gaz ziemny to paliwo przyszłościowe dla pojazdów*". Sympozjum pt. Perspektywy rozwoju rynku gazu sprężonego dla pojazdów. Warszawa, 14 stycznia 2004.
- [3] Takushi Toda, Masato Matsuki, Ben Knight: "*Development of a 1.7 liter CNG Engine for the 2001 Honda Civic GX*". Materiały z konferencji NGV 2000, October 17-19, 2000, Yokohama.
- [4] "*New Vehicle Evaluation Project-Emissions Testing*", [http://www.ott.doe.gov/out/field\\_ops/nve/emissions.html](http://www.ott.doe.gov/out/field_ops/nve/emissions.html).
- [5] C. Chung, JS Yoon, Jongwoo Kim: "*Development of Universal ECU for Natural Gas Vehicle*". 8th International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicles NGV 2002, October 8-10, 2002, Washington.