**REDUCING THE NEGATIVE IMPACT OF PUBLIC
TRANSPORT ON THE ENVIRONMENT
BY USING CNG AS A FUEL**

**OGRANICZENIE NEGATYWNEGO WPŁYWU
KOMUNIKACJI MIEJSKIEJ NA ŚRODOWISKO
NATURALNE POPRZECZ ZASTOSOWANIE
CNG JAKO PALIWA**

**Jerzy Merkisz, Paweł Fuc, Maciej Bajerlein, Michał Dobrzynski,
Łukasz Rymaniak, Andrzej Ziółkowski**

Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu
e-mail: jerzy.merkisz@put.poznan.pl; pawel.fuc@put.poznan.pl; maciej.bajerlein@put.poznan.pl;
michal.dobrzynski@put.poznan.pl; lukasz.m.rymaniak@doctorate.put.poznan.pl;
andrzej.wo.ziolkowski@doctorate.put.poznan.pl

Abstract: *The paper presents the results of emission research city buses fueled by compressed natural gas and diesel. The exhaust emission tests were performed under actual traffic conditions on a regular bus line. For the measurement was used a mobile exhaust analyzer for the group of PEMS – SEMTECH DS by Sensors Inc. Based on the obtained of the result the test determined the impact of applied compressed natural gas to reduce exhaust emissions for a vehicle fueled by diesel.*

Keywords: *compressed natural gas, exhaust emissions, road tests*

Streszczenie: *W artykule przedstawiono wyniki badań emisyjności autobusów komunikacji miejskiej zasilanych sprężonym gazem ziemnym i olejem napędowym. Drogowe badania emisji gazów wylotowych przeprowadzono na regularnej linii kursowania autobusów. Do pomiarów wykorzystano mobilny analizator gazów wylotowych z grupy PEMS (Portable Emissions Measurement System) – SEMTECH DS firmy Sensors Inc. Na podstawie otrzymanych wyników badań wyznaczono wpływ zastosowania sprężonego gazu ziemnego na ograniczenie emisji szkodliwych i toksycznych składników gazów wylotowych w odniesieniu do pojazdu zasilanego olejem napędowym.*

Słowa kluczowe: *sprężony gaz ziemny, emisja gazów wylotowych, badania drogowe*

1. Wstęp

Według badań przeprowadzonych przez Międzynarodową Agencję Energii IEA (*International Energy Agency*) światowe zapotrzebowanie na podstawowe surowce energetyczne w 2008 roku wyniosło $5,12 \cdot 10^{11}$ GJ. W porównaniu do roku 1973 zapotrzebowanie to zwiększyło się o około 50% [2]. Głównymi surowcami energetycznymi eksploatowanymi obecnie przez człowieka są: ropa naftowa, węgiel kamienny oraz gaz ziemny. W grupie państw należących do Organizacji Współpracy Gospodarczej i Rozwoju OECD (*Organization for Economic Co-operation and Development*) największy udział w zapotrzebowaniu energetycznym w 2009 roku miała ropa naftowa, który wyniósł 37,2%. Na drugim miejscu znajdował się gaz ziemny, którego udział wyniósł 24,2% [2]. Światowa produkcja gazu ziemnego począwszy od 1971 do 2009 roku zwiększyła się prawie trzykrotnie i wynosi obecnie około 3000 Tm³ (rys. 1). Liderami produkcji tego surowca są Stany Zjednoczone oraz Federacja Rosyjska.

Rys. 1. Światowa produkcja gazu ziemnego na przełomie 1971-2009 [2]

Rosnące zapotrzebowanie oraz niewystarczająca produkcja NG (*natural gas*) w Stanach Zjednoczonych spowodowała poszukiwanie nowych złóż tego surowca. Efektem intensywnych prac badawczych trwających od ponad 20 lat jest odkrycie oraz eksploatacja gazu ziemnego z niekonwencjonalnych źródeł. Terminem tym określa się ogólnie nowe typy złóż gazu, które ze względu na specyficzną technologię wydobycia nie były eksploatowane przez przemysł naftowy. Obecnie dzięki zwiększeniu opłacalności i rozwoju technik wydobycia możliwe jest eksploatowanie złóż gazu łupkowego (*shale gas*), gazu zamkniętego (*tight gas*), tj. gazu zatrzymanego w głębokich częściach basenów sedymentacyjnych.

2. Charakterystyka i technologie wydobycia gazu łupkowego

Gaz łupkowy składa się głównie z metanu wraz z domieszką gazów wysokowęgłowodorych takich jak: etan, propan czy butan. Rzadziej zawiera on gazy niewęgłowodorowe: azot, dwutlenek węgla czy siarkowodór.

Gaz łupkowy pod względem genezy powstawania jest taki sam jak gaz pochodzący ze złóż konwencjonalnych i powstaje w łupkach bogatych w substancje organiczne. Jest to jednak ta część gazu, która nie zdołała wydostać się ze skały macierzystej, ponieważ łupki mają bardzo niską zdolność do przepuszczania węglowodorów. Kluczowym parametrem geologicznym decydującym o wielkości złoża gazu jest wysoka koncentracja substancji organicznej w skale macierzystej. Rozproszone w skale konglomeraty szczątków organicznych przekształcając się w gaz ziemny wypalają się, pozostawiając po sobie pustki skalne, które zastępuje powstający gaz. Strefy nasyczone gazem występują w sposób ciągły na rozległym obszarze, który może obejmować nawet setki kilometrów – przykładowo wadwa o grubości 100 m może rozpościerać się w basenie o średnicy 50 km, z czego 10% wypełnia gaz, w dodatku sprężony [8].

Rys. 2. Rozkład niekonwencjonalnych złóż gazu ziemnego i ropy naftowej w basenie sedymentacyjnym [8]

W prawdzie złoża gazu łupkowego mają prostrą genezę i są łatwiejsze do znalezienia niż złoża konwencjonalne, ale produkcja z nich gazu ziemnego jest dużo trudniejsza. Wynika to z ich niskiej przepuszczalności dla gazu, a jeszcze niższej dla ropy naftowej. Przepuszczalność konwencjonalnych skał zbiornikowych zawiera się zazwyczaj w szerokim zakresie 1-1000 mD, natomiast dla łupków gazonośnych przepuszczalność jest rzędu nD. Oznacza to, że naturalna zdolność dopływu gazu ziemnego do wiertniczego otworu produkcyjnego jest znikoma [8].

sprężania pozostaje w formie gazowej. Jego wartość opałowa jest najwyższa spośród paliw silnikowych i wynosi 55,5 MJ/kg. W pojeździe CNG jest magazynowany w specjalistycznych zbiornikach wykonanych z materiałów kompozytowych zgodnie z normą ECE R110. LNG ze względu na swoją niską temperaturę wynoszącą -162°C musi być magazynowany w specjalistycznych zbiornikach kriogenicznych, co znacznie utrudnia jego eksploatację [3].

Dzięki wysokiej odporności gazu ziemnego na spalanie stukowe oraz łatwości mieszania się z powietrzem (szybsze uzyskanie mieszaniny jednorodnej) silniki zasilane CNG mogą pracować według obiegu Otto podobnie jak silniki zasilane benzyną. Ze względu na dużą wartość energii aktywacji zapłonu wymagane jest zastosowanie układów zapłonowych o wyższym wyładowaniu elektrycznym na elektrodach świecy zapłonowej (min. 30 kV). Silniki zasilane CNG ze względu na sposób tworzenia mieszanki możemy podzielić na dwie grupy: silniki o bezpośrednim wtrysku gazu do cylindra i silniki tworzące mieszankę paliwo-powietrzem poza komorą spalania. Najpopularniejsze obecnie są jednostki spalinowe o wiewpunktowym wtrysku paliwa do kolektora dolotowego. Silniki te mogą pracować zarówno na mieszankach stechiometrycznych, jak i ubogich. Wysokie dopuszczalne limity emisji gazów wylotowych spowodowały że silniki zasilane CNG pracują na mieszankach stechiometrycznych ze względu na zamontowany w układzie wylotowym pojazdu trójfunkcyjny reaktor katalityczny [1, 3].

4. Metodyka badawcza

Celem przeprowadzonych badań było porównanie emisji gazów wylotowych autobusów komunikacji miejskiej zasilanych sprężonym gazem ziemnym oraz olejem napędowym w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Aby najlepiej odwzorować rzeczywiste warunki eksploatacji pojazdów zdecydowano przeprowadzić badania na regularnej trasie kursowania autobusów MPK Poznań. Wybrano trasę zaliczaną do grupy najbardziej obciążonych tras w Poznaniu (rys. 4). Jej długość wynosi 16 km i posiada 43 przystanki. Zaczyna się w północnej części miasta, następnie przebiega przez ścisłe centrum miasta, a kończy się w południowej części miasta nieopodal autostrady A2. Duża liczba przystanków, a także przebieg trasy warunkują dużą zmianę przyspieszeń pojazdu, co znacząco wpływa na emisję gazów wylotowych i zużycie paliwa.

Obiektami badawczymi były dwa autobusy zasilane sprężonym gazem ziemnym i olejem napędowym (tab. 1). Autobus zasilany CNG wyposażony był w silnik o pojemności $8,9\text{ dm}^3$ i mocy 235 kW pracujący według obiegu Otto. Pojazd wyposażony był w trójfunkcyjny reaktor katalityczny wraz z sondą lambda pracującą w pętli sprężenia zwrotnego.

Rys. 4. Trasa wykorzystana do badań emisyjności pojazdów

Na dachu pojazdu umieszczono 8 kompozytowych zbiorników na sprężony gaz ziemny o pojemności 214 dm³ każda (rys. 5). Te zbiorniki zwiększyły wysokość pojazdu, do 3 400 mm, co w wielu przypadkach może stanowić poważne utrudnienie ze względu na infrastrukturę drogową danej aglomeracji miejskiej (wysokość wiaduktów, nisko zawieszona sieć trakcyjna, itp.). Pojazd zasilany olejem napędowym posiadał silnik spalinowy o pojemności 9,2 dm³ i mocy 231 kW. Pojazd był wyposażony w układ selektywnej redukcji katalizacyjnej oraz filtr cząstek stałych. Oba badane pojazdy spełniały normę emisji gazów wylotowych EEV.

Tabela 1. Charakterystyka badanych autobusów

Parametr	Pojazd zasilany CNG	Pojazd zasilany ON
Rodzaj zapłonu	Iskrowy	Samoczynny
Pojemność silnika	8,9 dm ³	9,2 dm ³
Liczba cylindrów	6	6
Moc maksymalna	235 kW przy 2000 obr/min	231 kW przy 1900 obr/min
Maksymalny moment obrotowy	1356 Nm przy 1300 obr/min	1275 Nm przy 1100÷1710 obr/min
Norma emisji gazów wylotowych	EEV	EEV
Układ oczyszczania gazów wylotowych	TWC	SCR/DPF
Długość	18 000 mm	18 000 mm
Wysokość	3 400 mm	3 050 mm
Waga	24 000 kg	24 000 kg

Rys. 5. Zbiorniki na CNG zainstalowane na dachu pojazdu A wraz z zamontowanym przepływomierzem do pomiaru masowego natężenia przepływu gazów wylotowych (zaznaczony czerwoną strzałką)

Do badań wykorzystano mobilny przyrząd SEMTECH DS służący do pomiaru szkodliwych i toksycznych składników gazów wylotowych w rzeczywistych warunków eksploatacji (rys. 6). Przyrząd umożliwiał pomiar CO_2 , CO , NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$), oraz THC ($\text{CH}_4 + \text{NMHC}$). Przyrząd posiada własną stację metrologiczną, system pozycjonowania GPS oraz umożliwia odczyt danych z układu diagnostycznego pojazdu [4-7].

Rys. 6. Aparatura pomiarowa zainstalowana we wnętrzu autobusu - SEMTECH DS

5. Wyniki badań i dyskusja

Na podstawie informacji odczytanych z układu GPS wyznaczano charakterystyki udziału czasu pracy w funkcji prędkości i przyspieszenia. Dla pojazdu zasilanego CNG wyróżniono dwa obszary o znacznym udziale czasu pracy (rys. 7a). Pierwszy przypadek dla biegu jałowego i wyniósł 25%, a drugi wystąpił w przedziale prędkości $8 \div 14$ m/s ($30 \div 50$ km) w zakresie przyspieszeń $0 \div 1,2$ m/s² i stanowił 44% całkowitego czasu pracy pojazdu. Dla pojazdu zasilanego olejem napędowym główny obszar pracy przypadł dla zakresu prędkości $0 \div 18$ m/s ($0 \div 65$ km/h) w przedziale przyspieszeń $-0,6 \div 1,2$ m/s² – podobnie jak w przypadku pojazdu zasilanego CNG (rys. 7b). Największy udział czasu pracy dla pojazdu zasilanego ON wystąpił dla biegu jałowego i wyniósł około 25%. Zbliżony rozkład udziału czasu pracy w przedziałach prędkości i przyspieszenia, jak również względna różnica średnich prędkości badanych pojazdów wynosząca 4% świadczą o powtarzalności przeprowadzonych pomiarów. Powyższe kryteria pozwoliły na porównanie emisyjności pojazdów w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Poniżej przedstawiono przykładowo przebiegi emisji sekundowej CO i NO_x uzyskane przez pojazdy podczas badań drogowych.

Analizując przebiegi emisji sekundowej CO stwierdzono, że pojazd zasilany CNG uzyskał wyższe jej wartości niż pojazd zasilany ON (rys. 8). To można uzasadnić odmiennym sposobem spalania mieszanki paliwowo-powietrznej – w silniku zasilanym CNG spalane są stechiometryczne, bądź do nich zbliżone, mieszanki. Sprzyja to nasileniu zjawiska niezupełnego spalania, które jest jedną z głównych przyczyn powstawania CO. W silnikach zasilanych ON spalane są mieszanki ubogie – z dużym współczynnikiem nadmiaru powietrza. Skutkuje to intensywniejszym utlenieniem CO do CO₂ niż w przypadku spalania mieszanek stechiometrycznych.

Rys. 7. Charakterystyka udziału czasu pracy pojazdu w przedziałach prędkości i przyspieszenia: a) pojazd zasilany CNG, b) pojazd zasilany ON

Rys. 8. Przebieg emisji sekundowej CO oraz przyspieszenia pojazdów zasilanych CNG i ON

Odminną sytuację zaobserwowano w przypadku emisji sekundowej NO_x (rys. 9). Pojazd zasilany ON charakteryzował się o wiele większą emisją niż pojazd zasilany CNG. To wynikało przede wszystkim z charakterystyki pracy pozasilnikowych układów oczyszczania gazów wylotowych zaimplementowanych w układach wylotowych pojazdów. W przypadku pojazdu zasilanego CNG zastosowany trójfunkcyjny reaktor katalityczny (TWC) charakteryzuje się bardzo wysokim stopniem konwersji NO_x – na poziomie ponad 90%. W przypadku układu selektywnej redukcji katalitycznej (SCR) stopień konwersji NO_x uzależniony jest od szeregu czynników. Jak pokazały wcześniejsze, niepublikowane badania autorów osiągnięcie wysokiego stopnia konwersji przez układ SCR podczas rzeczywistej eksploatacji jest trudne. Ten fakt potwierdza wynik badań zrealizowanych w niniejszej pracy, w których pojazd zasilany ON uzyskał o 90% wyższą emisję sekundową NO_x niż pojazd zasilany CNG. Na dodatkowe poparcie tej tezy, można stwierdzić że przejazd pojazdu zasilanego CNG charakteryzował się większą zmiennością przyspieszeń. Większa zmienność przyspieszeń pojazdu powoduje wzrost zużycia paliwa, którego efektem jest m.in. wyższa temperatura w komorze spalania silnika. To stwarza korzystne warunki do formowania NO_x (mechanizm szybkiego powstawania NO_x).

Rys. 9. Przebieg emisji sekundowej NO_x oraz przyspieszenia pojazdów zasilanych CNG i ON

6. Podsumowanie, Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów emisji gazów wylotowych stwierdzono, że względna różnica emisji drogowej dla pojazdu zasilanego CNG w odniesieniu do pojazdu zasilanego ON kształtowała się następująco (rys. 10):

- CO_2 spadek o 6%,
- CO wzrost o 45%,
- NO_x spadek o 90%,
- THC wzrost o 156%.

Powyższe wartości świadczą o zmniejszeniu negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne pojazdów komunikacji miejskiej zasilanych CNG – w przypadku CO_2 i NO_x . Należy podkreślić, że są to związki które odpowiadają głównie za efekt cieplarniany i zmniejszenie ich emisji wpływa lokalnie na ograniczenie zjawiska smogu fotochemicznego. Zasadnym zatem staje się włączenie do floty miejskich operatorów komunikacyjnych pojazdów zasilanych CNG, gdyż poprawi to sumaryczny bilans emisji.

Rys. 10. Względna emisja drogowa CO₂, CO, NO_x, THC dla obu pojazdów

7. Literatura

- [1] Ambrozik A.: Wybrane zagadnienia procesów cieplnych w tłokowych silnikach spalinowych; Wyd. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2003.
- [2] IEA STATISTICS: Natural Gas Information; France 2010.
- [3] Kruczyński S., Wołoszyn R., Stępniewski M.: Spalanie mieszanki gazu ziemnego z powietrzem w silniku o zapłonie iskrowym; Combustion Engines / Silniki Spalinowe 3/2011 (146), 2011.
- [4] Merkisz J., Lijewski P., Fuc P., Pielecha J.: Exhaust emission tests from agricultural machinery under real operating conditions. SAE 2010 Commercial Vehicle Engineering Congress, October, 2010, Chicago, IL, USA, SAE Paper 2010-01-1949, 2010.
- [5] Merkisz J., Fuc P.: The Exhaust Emission from Light Duty Vehicles in Road Test in Urban Traffic. SAE Technical Paper Series 2010-01-1558, (2010).
- [6] Merkisz J., Pielecha J., Fuc P., Lijewski P.: The analysis of the PEMS measurements of the exhaust emissions from city buses using different research procedures. The 8th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference VPPC 2012, Org. KIEE, Paper No. F20120618-0339Seul 9-12.10.2012, s. 903-907.
- [7] Merkisz J., Idzior M., Pielecha J., Gis. W.: Emission tests in city buses under real road conditions. Book "Urban Transport XVI – Urban Transport and the Environment in the 21st Century", Edited by A. Pratelli and C.A. Brebbia. WIT Transactions. WIT Press 2010, Wessex, UK, s. 181-189.
- [8] Poprawa P.: Nadzieja w łupkach; Wiedza i Życie – Energia; numer specjalny 5/2011.
- [9] www.mos.gov.pl

Prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz. *Profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu.*

Dr inż. Paweł Fuc. *Adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu.*

Dr inż. Maciej Bajerlein. *Adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu*

Mgr inż. Michał Dobrzynski. *Doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu.*

Mgr inż. Łukasz Rymaniak. *Doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu.*

Mgr inż. Andrzej Ziółkowski. *Doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu.*