

The evaluation of the ecological consequences of the application of bioethanol in municipal public transportation

The paper presents systematized environmental perils resulting from the operation of combustion engines. A serious environmental threat was identified in the sector of public transportation. Hence, pro ecological projects in the public transportation sector have been presented. As a particular ecological solution bioethanol E95 has been presented as an alternative fuel for diesel engines. An analysis of the emissions from city buses has been performed: conventional and hybrid buses, fitted with diesel engines, fuelled with diesel oil and bioethanol E95. It has been observed that the application of bioethanol E95 ready engines leads to much better pro ecological results than the application of hybrid solutions.

Key words: municipal transportation, environment protection, emissions, combustion engines, bioethanol E95

Ocena ekologicznych skutków stosowania paliwa bioetanolowego w transporcie miejskim

W pracy przedstawiono usystematyzowane zagrożenia środowiska z powodu emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych. Stwierdzono znaczne zagrożenie ze strony autobusów komunikacji miejskiej. W związku z tym przedstawiono proekologiczne przedsięwzięcia w autobusowym transporcie miejskim. Jako szczególnie ekologiczne rozwiązanie przedstawiono zastosowanie paliwa bioetanolowego E95 do zasilania silników o zapłonie samoczynnym. Przeprowadzono analizę emisji zanieczyszczeń z autobusów miejskich: klasycznych i z napędem hybrydowym, wyposażonych w silniki o zapłonie samoczynnym zasilane: olejem napędowym i paliwem bioetanolowym E95. Stwierdzono, że zastosowanie silników bioetanolowych umożliwia osiągnięcie znacznie lepszych efektów ekologicznych niż zastosowanie nawet napędów hybrydowych.

Słowa kluczowe: transport miejski, ochrona środowiska, emisja zanieczyszczeń, silniki spalinowe, paliwo bioetanolowe E95

1. Introduction

Environment protection is becoming a basic requirement during the manufacturing and operation of the products of civilization as well as during their recycling. The means of public transportation, where city buses play an important role, fall into that category as well. Public transportation facilitates access to any location within a municipal area and the bus routes are easy to modify even in a makeshift manner. In the city centers, usually closed for truck traffic (except for local delivery) and limited for passenger car traffic bus transportation dominates the traffic.

The most important environmental perils resulting from public transportation is the emission of toxic components, noise and generating road vibration [5]. Many people are exposed to these threats as the threats pertain to large agglomerations and all the elements of the natural environment such as: people, animals, plants, air, water, soil, terrain and the natural resources (raw materials for the production of the vehicles, road infrastructure and consumables – fuels in particular [5].) The civilization environment is also in danger (buildings and other products of humanity).

In large agglomerations particular attention is drawn to the emission of toxic components.

The most significant environmental perils resulting from the operation of vehicles are [3, 5–8]:

- 1) local threats – the most dangerous are the emissions- nitrogen oxides and particulate matter (in the form of dust, PM10) and organic compounds. In city centers the largest source of these emissions are diesel engines fitted in city buses. The local threats are also caused by photochemical smog whose occurrence is encouraged by the emission of

1. Wstęp

Ochrona środowiska staje się podstawowym wymogiem przy wytwarzaniu i eksploatacji wytworów cywilizacji, a także przy ich zagospodarowywaniu po kasacji. Do wytworów cywilizacji należą między innymi środki transportu, odgrywające szczególną rolę w komunikacji miejskiej, w której ważną rolę odgrywa transport autobusowy. Umożliwia on dotarcie prawie do wszystkich miejsc, jest łatwy do modyfikacji linii komunikacyjnych – także w warunkach doraźnych. W centrach aglomeracji miejskich, zazwyczaj zamkniętych dla ruchu samochodów ciężarowych (poza lokalnym dowozem towarów), oraz o bardzo ograniczonym ruchu prywatnych samochodów osobowych, komunikacja autobusów miejskich jest dominująca w ogólnym ruchu wszystkich środków transportu drogowego.

Do najważniejszych zagrożeń dla środowiska powodowanych przez autobusy komunikacji miejskiej zalicza się emisję zanieczyszczeń i hałasu oraz wymuszanie drgań podłoża [5]. Na zagrożenia te jest narażonych dużo ludzi, ponieważ dotyczą one wielkich aglomeracji miejskich i jednocześnie dotyczą wszystkich elementów środowiska naturalnego: ludzi, zwierząt, roślin, powietrza, wód, gleby, krajobrazu i terenu, a w ogólnej skali – również zasobów naturalnych, w związku ze zużywaniem materiałów konstrukcyjnych do budowy i eksploatacji pojazdów i infrastruktury ruchu drogowego oraz materiałów eksploatacyjnych, w szczególności paliw [5]. Zagrożone jest również środowisko cywilizacyjne, m.in. budowle i inne wytwory ludzi.

W wielkich aglomeracjach miejskich szczególną uwagę w ochronie środowiska przed skutkami motoryzacji zwraca się na emisję zanieczyszczeń.

the precursors of tropospheric ozone from the combustion engines NO_x and volatile organic compounds;

2) global threats – the emission of greenhouse gases in particular whose main representative in relation to road transportation is carbon dioxide. The intensification of the greenhouse effect is mainly caused by the fossil carbon dioxide that does not come from renewable energy carriers.

The environmental threats related to the combustion of fuels in combustion engines are analyzed in terms of: health protection of living organisms, climate protection and the protection of natural resources being the source of the fuels.

The evaluation of the threats related to the automotive industry in the whole process of production operation and recycling of the materials is also of significant importance. In relation to pollution it usually goes down to determining the pollution in a scale: from obtaining the primary energy carriers, converting it into the energy carriers used to fuel vehicles ending up on the emissions from the vehicle itself (*from well to wheels* [17, 18]) Hence, apparently clean energy e.g. electrical energy may turn out to be very dirty if it is obtained with the use of non-ecological technologies. A precise determining of the moment the obtaining of the primary energy carriers begins is impossible due to the arbitrary character of the financial expenditure for the obtaining of the said carriers. The emission level determined from well to wheel is very sensitive to the applied technologies of energy carrier conversions, bio-components in particular. Thus, the determined results of the well to wheel emissions should be treated with a certain amount of distrust. It is known however that low emission bio-component processing technologies exist and, thus, such calculated emissions are to be treated as very low.

2. Proecological actions in bus municipal transportation

Analyzing the local and global environmental threats there is a necessity [3, 6–8, 14, 16] to:

- reduce fuel consumption, particularly those fuels with high carbon content,
- apply modern technological solutions, vehicle drive-trains in particular.

The reduction of fuel consumption is possible through [3, 6–8]:

- stabilization of the engine operating conditions,
- increasing overall efficiency of the engines,
- increasing of the efficiency of the drive-trains through partial energy recuperation during braking.

Radical decrease in the emission of fossil carbon dioxide is possible through the application of renewable fuels [3, 6–9, 11–16]. Such a condition is fulfilled by the fuels of high bio-component content also known as natural biofuels.

The stabilization of the engine operating conditions can be realized through the improvement of the vehicle traffic and the application of hybrid technologies. The improvement of vehicle traffic is realized through traffic management in

Śpośród najistotniejszych zagrożeń środowiska naturalnego i cywilizacyjnego powodowanych przez samochody należy wymienić przede wszystkim [3, 5–8]:

- 1) zagrożenia lokalne – najbardziej uciążliwymi są emisje zanieczyszczeń, przede wszystkim tlenków azotu i cząstek stałych (pył zawieszony, cząstki stałe PM10) oraz związków organicznych. W centrach miejskich znaczącym źródłem emisji tych zanieczyszczeń są silniki o zapłonie samoczynnym, napędzające autobusy miejskie. Zagrożenia lokalne są powodowane także przez oddziaływanie złożone, przede wszystkim smog fotochemiczny, którego występowaniu sprzyja emisja prekursorów ozonu troposferycznego – z silników spalinowych przede wszystkim tlenków azotu i lotnych związków organicznych;
- 2) zagrożenia globalne – szczególnie emisja gazów cieplarnianych, których głównym przedstawicielem w odniesieniu do transportu drogowego jest dwutlenek węgla. Do intensyfikacji zjawiska cieplarnianego w atmosferze przyczynia się dwutlenek węgla kopalnego, nie pochodzącego z odnawialnych nośników energii.

Podsumowując, zagrożenia dla środowiska związane ze spalaniem paliw w silnikach spalinowych pojazdów rozpatruje się przede wszystkim ze względu na: ochronę zdrowia organizmów żywych, ochronę klimatu oraz ochronę zasobów naturalnych, będących źródłem paliw.

Istotna jest również ocena zagrożeń związanych z motoryzacją – w całym ciągu wytwarzania, eksploatacji i zagospodarowania zużytych obiektów i materiałów. W odniesieniu do emisji zanieczyszczeń zazwyczaj sprowadza się to do wyznaczenia jej w skali: od pozyskiwania nośników energii pierwotnej, przetwarzania ich na nośniki energii wykorzystywane do napędu pojazdu, aż do emisji zanieczyszczeń z pojazdu. W literaturze angielskojęzycznej na ten ciąg działań jest używane określenie *from well to wheels* [17, 18]. W związku z tym pozornie „czysta” energia, np. elektryczna, może się okazać wyjątkowo „brudna”, jeśli jest pozyskiwana z zastosowaniem nieekologicznych technologii. Precyzyjne określenie początku pozyskiwania nośników energii pierwotnej nie jest w ogólności możliwe, m.in. z powodu umowności nakładów materialnych na to pozyskiwanie. Emisja zanieczyszczeń wyznaczana w sposób ciągły jest bardzo wrażliwa na stosowane technologie przeróbki nośników energii, szczególnie w przypadku biokomponentów, dlatego do wyznaczanych wyników emisji ciągłej należy podchodzić z dużą ostrożnością. Wiadomo jest jednak, iż istnieją obecnie „niskoemisyjne” technologie przetwarzania biokomponentów, w związku z tym emisje obliczone w taki sposób trzeba traktować jako granicznie małe, możliwe do osiągnięcia.

2. Proekologiczne przedsięwzięcia w autobusowym transporcie miejskim

W sytuacji zagrożeń środowiska, zarówno lokalnych, jak i globalnych, istnieje konieczność [3, 6–8, 14, 16]:

- zmniejszenia zużycia paliw, w szczególności z dużym udziałem węgla,
- stosowania nowoczesnych rozwiązań technicznych, przede wszystkim w napędach pojazdów.

large cities. A radical improvement of the stabilization of the engine operation is possible through the application of hybrid drive-trains. This is of particular importance for the vehicles operated in the urban areas. The reduction of the fuel consumption in hybrid technologies applied in city buses could reach up to 30% [15].

The improvement of the traffic conditions and the application of the hybrid drive-trains enable the stabilization of the engine operation. This also results in a reduction of the emissions.

The real pro ecological initiatives for city buses are as follows:

1. Perfecting the diesel engines fuelled with diesel oil – fulfilling the emission level of Euro V and Euro VI.
2. The application of alternative fuels:
 - natural gas NG (non-renewable fuel),
 - biofuels – renewable fuels:
 - biogas – BG,
 - RME – B100, B20,
 - bioethanol – E95,
 - other biofuels (e.g. synthetic diesel oil derived from biomass).
3. The application of hybrid and electric powertrains:
 - hybrid – gasoline electric or diesel electric,
 - hybrid gasoline electric or diesel electric with an external source of electric power,
 - electric powertrains,
 - hybrid powertrains with fuel cells.

Currently, the combustion engines are the dominant form of propulsion. That is why the emission from a combustion engine (*from well to wheels*) is so important.

3. Diesel engines fuelled with bioethanol E95 as a pro-ecological solution

Despite all the solutions improving the conditions of engine operation in a bus, the ecological properties of the engine itself are the biggest limitation in terms of ecology. The evolution of the emission requirements can be presented as a set of limits of unit emissions in international regulations. Figure 1 presents the emission limits from diesel engines for vehicle of GVW higher than 3.5 Mg in a stationary test ESC (*European Stationary Cycle*) [5, 10].

Figure 2 presents the emission limits from diesel engines for vehicles of GVW higher than 3.5 Mg in a dynamic test ETC (*European Transient Cycle*) [5, 10].

The Euro IV limits are binding until 2009. The EEV limits (*Enhanced Environmentally Friendly Vehicle*) were set forth along with the Euro III as limits for particularly clean engines. Starting from April 2013 the Euro VI limits are to be introduced. The stationary ESC

Zmniejszenie zużycia paliwa jest możliwe dzięki [3, 6–8]:

- stabilizacji warunków pracy silników spalinowych,
- zwiększeniu sprawności ogólnej silników spalinowych,
- zwiększeniu sprawności układów napędowych w wyniku odzyskiwania części energii pojazdu, rozpraszanej w napędach klasycznych w czasie hamowania.

Radykalne zmniejszenie emisji dwutlenku węgla kopalnego jest możliwe dzięki zastosowaniu do zasilania silników spalinowych paliw odnawialnych [3, 6–9, 11–16]. Warunek taki spełniają paliwa o dużym udziale biokomponentów, zwane biopaliwami samoistnymi.

Stabilizacji warunków pracy silników spalinowych sprzyja: racjonalizacja warunków ruchu pojazdów oraz stosowanie napędów hybrydowych. Racjonalizacja warunków ruchu pojazdów jest osiągnięta przez zarządzanie ruchem pojazdów w miastach. Radykalnie stabilizację warunków pracy silników spalinowych można poprawić, stosując napędy hybrydowe. Ma to szczególne znaczenie dla pojazdów użytkowanych w warunkach ruchu w miastach. Korzyści ze zmniejszenia zużycia paliwa przy zastosowaniu napędów hybrydowych w autobusach miejskich mogą dochodzić nawet do 30% [15].

Racjonalizacja warunków ruchu pojazdów i – szczególnie – zastosowanie napędów hybrydowych umożliwiają, jak wiadomo, stabilizację warunków pracy silnika spalinowego. Sprzyja to również zmniejszeniu emisji zanieczyszczeń.

Realne proekologiczne inicjatywy w autobusach miejskich są następujące:

1. Doskonalenie silników o zapłonie samoczynnym zasilanych olejem napędowym – osiąganie poziomów ekologicznych Euro V i Euro VI.
2. Zastosowanie paliw alternatywnych:
 - gazu ziemnego – NG (paliwo nieodnawialne),
 - biopaliw – paliw odnawialnych:
 - biogazu – BG,
 - estrów olejów roślinnych – B100, B20,
 - paliwa bioetanolowego – E95,

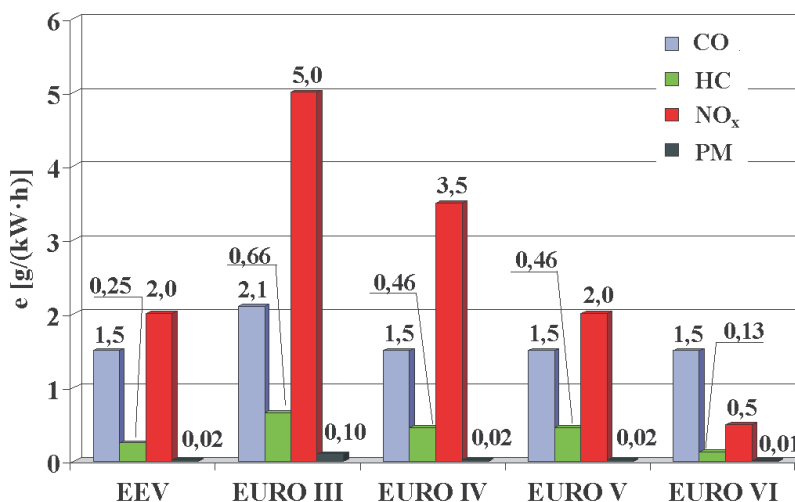


Fig. 1. Unit emission limits in a stationary test ESC

Rys. 1. Limity emisji jednostkowej zanieczyszczeń w teście statycznym ESC

test determines the unit emissions of: carbon monoxide – CO, hydrocarbons – HC, nitrogen oxides – NO_x (simplified to nitrogen monoxide) and particulate matter PM. In the dynamic ETC test instead of the unit emission of the hydrocarbons the unit emission of non methane hydrocarbons (NMHC) and methane CH₄ are obtained (unit emission of hydrocarbons is obtained for the Euro VI only for diesel engines).

Currently diesel engines meet the requirements of Euro V and EEV only.

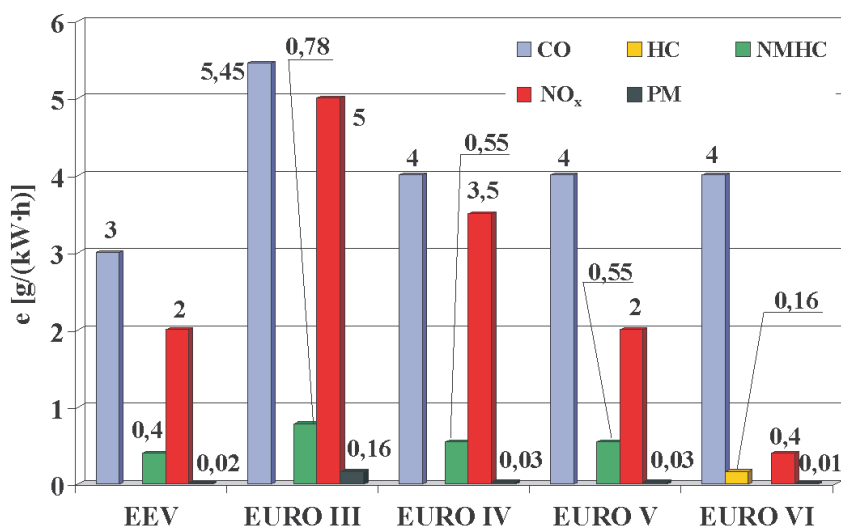
The application of natural gas results in ecological benefits in terms of the emissions – PM and NO_x in particular. Natural gas is not however a renewable fuel and the com-

– innych biopaliw (np. syntetycznego oleju napędowego pochodzącego z przeróbki biomasy).

3. Zastosowanie napędów hybrydowych i elektrycznych:
 - napędów hybrydowych spalinowo-elektrycznych,
 - napędów hybrydowych spalinowo-elektrycznych z zewnętrznym źródłem zasilania elektrycznego,
 - napędów elektrycznych,
 - napędów hybrydowych z zastosowaniem ogniw paliwowych.

Obecnie są rozwijane przede wszystkim formy napędów z zastosowaniem silników spalinowych. Z tego powodu tak istotne znaczenie ma emisja zanieczyszczeń z silnika spalinowego z uwzględnieniem przedstawionych uwag o szacowaniu emisji ciągnionej zanieczyszczeń.

a)



b)

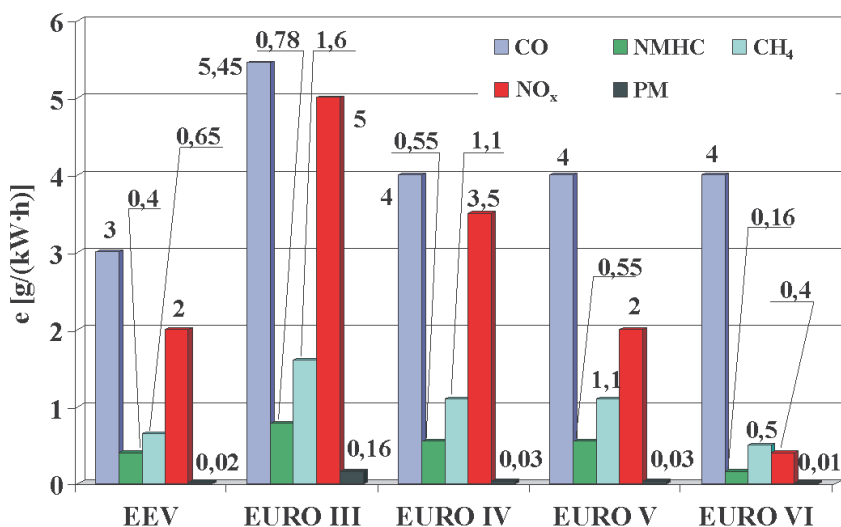


Fig. 2. Unit emission limits in a dynamic ETC test: a – for diesel engines, b – for spark ignition engines fuelled with gaseous fuels

Rys. 2. Limity emisji jednostkowej zanieczyszczeń w teście dynamicznym ETC: a – dla silników o zapłonie samoczynnym, b – dla silników o zapłonie iskrowym na paliwa gazowe

3. Silniki o zapłonie samoczynnym na paliwo bioetanolowe E95 jako rozwiązanie proekologiczne

Mimo wszystkich sposobów poprawy warunków pracy silnika spalinowego w zespole napędowym autobusu, właściwości ekologiczne samego silnika są największym ograniczeniem możliwych osiągnięć ekologicznych. Ewolucję w wymaganiach ze względu na emisję zanieczyszczeń można przedstawić w postaci limitów emisji jednostkowej, obowiązujących w przepisach międzynarodowych. Na rysunku 1 przedstawiono limity emisji zanieczyszczeń z silników o zapłonie samoczynnym dla pojazdów o dopuszczalnej masie całkowitej większej niż 3,5 Mg w teście statycznym ESC (*European Stationary Cycle* – europejski test statyczny) [5, 10].

Na rysunku 2 przedstawiono limity emisji zanieczyszczeń z silników o zapłonie samoczynnym dla pojazdów o dopuszczalnej masie całkowitej większej niż 3,5 Mg w teście dynamicznym ETC (*European Transient Cycle* – europejski test dynamiczny) [5, 10].

Limity Euro IV obowiązują do 2009 r. Limity EEV (*Enhanced Environmentally Friendly Vehicle* – pojazd przyjazny środowisku) zostały ustanowione wraz z Euro III jako limity dla silników, którym są stawiane szczególnie duże wymagania odnośnie do emisji zanieczyszczeń. Od kwietnia 2013 r. przewiduje

monly used NG engines are simple conversions of diesel engines into spark ignition engines, which in turn leads to a reduction of the overall efficiency as compared to regular diesel engines. Besides, making natural gas a popular fuel in road transportation requires investments in the infrastructure. The fact that natural gas is not treated as an ecological solution results from the non-renewability of this fuel.

Biogas has many common features with natural gas, but is a renewable fuel which is a very strong argument for its application. Unfortunately the properties of biogas vary widely depending on its origin, hence in order to fuel traction engines these properties must be unified and this complicates the common application of this fuel.

Until recently the only bio-alternative for diesel engines were vegetable oil esters (RME). Yet, the operating properties of this fuel, including the ecological considerations (emissions) are not too promising. The advantage of this fuel is that it is treated as a substitute for diesel oil i.e. the engines may be fuelled with a classic fuel or RME. What seems to be an advantage is in fact a flaw as this solution is unprofessional. Modern combustion engines are highly specialized designs made to operate with a specific fuel type: all autonomous ECU algorithms (injection angle, injection timing, exhaust gas recirculation coefficient, charging pressure) are optimized in terms of the usable properties of the engine (overall efficiency, emission limits) taking the fuel properties into account. The modification of the original fuel will render these algorithms unoptimal in terms of the engine usable properties hence the lack of professionalism in this solution. Apart from the above, RME have a serious flaw – their combustion leads to an increased emission of NO_x [5]. RME also result in a variety of operational issues (engine cold start at low ambient temperatures).

Another interesting bio fuel may be synthetic diesel oil obtained from biomass. It is, similarly to RME, a substitute fuel for regular diesel oil which saves the engineers the time to develop an entirely new engine. This is an advantage that could make this fuel popular. If we want to make the new fuel similar to the conventional fuel, however, we cannot fully use the properties that a given raw material has. In such a situation there must be a compromise between the obtainable engine properties and the easiness of the fuel popularization.

If we include the emission of the fossil carbon dioxide in the overall pollution then in this context the currently cleanest diesel engine is the engine fuelled with bioethanol E95 [3, 6–9, 11, 13–16]. E95 is a natural biofuel. It is a mixture of 92% of 95% ethanol and additives (ignition activator 5% – Tab. 1 [12]).

A bioethanol engine DC9 E02 270 is designed based on the family of 5 cylinder diesel engines, ready for diesel oil and biofuel fuelling (B100 and B20) (RME based). This engine family comprises DC9 16 230 and DC9 17 270. As opposed to a conventional diesel engine the bioethanol engine has undergone the following modifications [15]:

- increased compression ratio from 18 to 28,
- modified fuel supply system:

się wprowadzenie limitów Euro VI. W teście statycznym ESC wyznacza się emisję jednostkową: tlenku węgla – CO, węglowodorów – HC, tlenków azotu – NO_x (sprowadzonych do tlenku azotu) i cząstek stałych PM. W teście dynamicznym ETC zamiast emisji jednostkowej węglowodorów wyznacza się emisję jednostkową niemetanowych węglowodorów NMHC oraz metanu CH_4 (emisję jednostkową węglowodorów wyznacza się dla limitów Euro VI tylko w przypadku silników o zapłonie samoczynnym).

Obecne silniki o zapłonie samoczynnym spełniają tylko limity Euro V i EEV.

Zastosowanie gazu ziemnego umożliwia uzyskanie korzystnych właściwości ekologicznych ze względu na emisję zanieczyszczeń, szczególnie cząstek stałych i tlenków azotu. Gaz ziemny nie jest jednak paliwem odnawialnym, a powszechnie stosowane silniki na gaz ziemny są prostymi technicznie przeróbkami silników o zapłonie samoczynnym na silniki o zapłonie iskrowym, w związku z czym sprawność ogólna tych silników jest mniejsza niż odpowiadających im silników o zapłonie samoczynnym. Ponadto rozpowszechnienie gazu ziemnego w transporcie drogowym wymaga dużych inwestycji w infrastrukturę. O niestosowaniu gazu ziemnego jako rozwiązania ekologicznego przesądza przede wszystkim nieodnawialność tego paliwa.

Biogaz ma wiele cech wspólnych z gazem ziemnym, jest jednak paliwem odnawialnym i to jest mocny argument ekologiczny przemawiający za jego stosowaniem. Niestety, właściwości biogazu znacznie różnią się w zależności od jego pochodzenia, zatem do zasilania trakcyjnych silników spaliny konieczne jest ujednolicenie tych właściwości, a to dodatkowo komplikuje powszechne stosowanie biogazu.

Do niedawna jedynym alternatywnym zasilaniem biopaliwowym silników o zapłonie samoczynnym było stosowanie estrów olejów roślinnych. Niestety, właściwości eksploatacyjne, w tym ekologiczne, ze względu na emisję zanieczyszczeń, silników zasilanych estrami olejów roślinnych są najlepsze. Zaletą tego paliwa jest to, że jest ono traktowane jako zastępcze w stosunku do oleju napędowego, tzn. że silniki mogą być zasilane albo paliwem klasycznym, albo estrami olejów roślinnych. To co wydaje się zaletą, okazuje się w istocie wadą, jest to bowiem rozwiązanie nieprofesjonalne. Współczesne silniki spalinowe są konstrukcjami wysoko wyspecjalizowanymi, przystosowanymi do właściwości paliw; przykładowo: wszystkie autonomiczne algorytmy sterowania (kąt dawki paliwa, wyprzedzenia wtrysku, stopień recyrkulacji spalin, ciśnienie doładowania) są optymalizowane ze względu na właściwości użytkowe silnika (sprawność ogólna, emisja zanieczyszczeń), z uwzględnieniem właściwości paliw. Zmiana paliwa oryginalnego na paliwo o innych właściwościach sprawia, iż algorytmy te nie są optymalne ze względu na właściwości użytkowe silnika, a zatem jest to rozwiązanie nieprofesjonalne. Oprócz tego estry olejów roślinnych mają bardzo istotną wadę – powodują one mianowicie zwiększenie emisji szczególnie szkodliwych tlenków azotu [5]. Także estry olejów roślinnych powodują znaczne problemy eksploatacyjne, związane m.in. z rozruchem silnika, szczególnie w niskich temperaturach otoczenia.

Table 1. E95 composition

Tabela 1. Skład paliwa E95

Fuel composition/składnik paliwa	Mass share/udział masowy
Ethanol 95% v/v/etanol	92.2%
Ignition activator/aktywator zapłonu	5%
Ether MTBE	2.3%
Isobutanol/izobutanol	0.5%
Corrosion inhibitor/inhibitor korozji	90 ppm

- modifications in the control of the fuel dosage,
- increased fuel pump capacity,
- larger diameters of the injection nozzles,
- different gaskets and filters (design and materials),
- modifications in the design of the intercooler,
- different control algorithms (charging pressure, injection angle exhaust gas recirculation coefficient).

Table 2 presents the basic parameters of Scania DC9 E02 270 [13].

Table 2. Basic parameters of Scania DC9 E02 270

Tabela 2. Podstawowe parametry silnika Scania DC9 E02 270

Quantity/wielkość	Value/wartość
Displacement/objętość skokowa	8.7 dm ³
Number of cylinders/liczba cylindrów	5
Compression ratio/stopień sprężania	28
Rated power/moc znamionowa	199 kW
Rated revolutions per minute/znamionowa prędkość obrotowa	1900 min ⁻¹
Maximum torque/maks. moment obrotowy	1200 N·m
RPM at Maximum torque/prędkość obrotowa maks. momentu obrotowego	(1100–1400) min ⁻¹

The bioethanol Scania DC9 E02 270 engine is fitted with a pump nozzle fuel system. There are four valves per cylinder. EGR and OxyCat are a standard solution in this engine.

Diesel engines bioethanol ready have very good ecological properties as opposed to conventional diesel engines [3, 6–9, 11, 13–16]. This is confirmed by the homologation emission test results: stationary ESC and dynamic ETC tests [17]. Apart from the unit emission, set forth in the homologation regulations, the emission of potential tropospheric ozone was tested additionally. The ability to form ozone by chemical substances is characterized by: ozone-forming potential [1, 2]. The unit activity of ozone formation is the ratio of the formed ozone mass and the mass of the non-methane hydrocarbons. The unit emission of fossil carbon dioxide was compared as well in the ETC and ESC tests from the DC9 E02 270 engine and the engine on the EEV emission level using the results of the tests performed in Environment Canada.

The results of the comparative tests of the unit emission of pollutants in the ESC and ETC tests from the DC9 E02 270 engine have been shown in Fig. 3–8. In the figures, a relative difference of the unit emission from the DC9 E02 270 engine and the EEV limits have been shown as well.

Z innych biopaliw warto zwrócić uwagę na syntetyczny olej napędowy, przerabiany z biomasy. Jest to – podobnie jak estry olejów roślinnych – paliwo zastępcze w stosunku do oleju napędowego, dzięki czemu nie ma potrzeby konstruowania specjalnego silnika – jest to zaleta dająca możliwości rozpowszechnienia tego biopaliwa. Jednocześnie, chcąc uczynić paliwa podobne do klasycznego, nie można jak najlepiej wykorzystać właściwości, jakie ma dostępny surowiec. W takiej sytuacji zdecydowanie kompromis między możliwymi do osiągnięcia właściwościami silnika i łatwością rozpowszechniania paliwa.

Jesli wśród zanieczyszczeń uwzględnimy również emisję dwutlenku węgla kopalnego, to w tym kontekście najczystszym obecnie silnikiem o zapłonie samoczynnym jest silnik zasilany paliwem bioetanolowym E95 [3, 6–9, 11, 13–16]. Paliwo E95 stanowi samoistne biopaliwo. Jest to mieszanina o zawartości ponad 92% masowo 95-procentowego etanolu oraz dodatków uszlachetniających, przede wszystkim tzw. aktywatora zapłonu w ilości 5% masowo – tab. 1 [12].

Silnik bioetanolowy DC9 E02 270 jest konstruowany na bazie rodziny pięciocylindrowych silników o zapłonie samoczynnym, przystosowanych do zasilania olejem napędowym oraz biopaliwami B100 i B20 (na bazie estrów metylowych olejów roślinnych). Do tej rodziny silników należą m.in. DC9 16 230 i DC9 17 270. W stosunku do klasycznego silnika o zapłonie samoczynnym w silniku bioetanolowym wprowadzono przede wszystkim następujące zmiany [15]:

- zwiększono stopień sprężania z 18 do 28,
- dokonano zmian w układzie zasilania:
 - zmiany sterowania dawkowania paliwa,
 - zwiększono wydajność pompy paliwa,
 - zastosowano większe średnice otworów rozpylaczy,
 - zmieniono uszczelki i filtry ze względu zarówno na konstrukcję, jak i na materiały,
- dokonano zmian konstrukcji chłodnicy powietrza doładowania,
- wprowadzono inne algorytmy sterowania, m.in. ciśnienia doładowania, kąta wyprzedzenia wtrysku i współczynnika recyrkulacji spalin.

W tabeli 2 przedstawiono podstawowe parametry silnika Scania DC9 E02 270 [13].

Bioetanolowy silnik Scania DC9 E02 270 jest wyposażony w układ zasilania z pompowtryskiwaczami. Zastosowano w nim rozrząd czterozaworowy na każdy cylinder. Standardowo zastosowano w silniku recyrkulację spalin oraz utleniający reaktor katalityczny.

Silniki o zapłonie samoczynnym na paliwo bioetanolowe mają, w stosunku do klasycznych silników zasilanych olejem napędowym, bardzo dobre właściwości ekologiczne [3, 6–9, 11, 13–16]. Świadczą o tym wyniki badań emisji zanieczyszczeń w warunkach homologacyjnych: w teście statycznym ESC i dynamicznym ETC [17]. Oprócz emisji jednostkowej zanieczyszczeń, limitowanej w przepisach homologacyjnych, dodatkowo zbadano również emisję potencjalnego ozonu troposferycznego. Zdolność do tworzenia ozonu przez substancje chemiczne charakteryzuje potencjał tworzenia ozonu (OFP – *ozone-forming potential*) [1, 2]. Aktywność jednostkowa tworzenia ozonu to stosunek

The graphs clearly show very good ecological properties of the bioethanol engine in terms of the emissions. Additionally in Fig. 9 the relative difference of the unit emissions from the bioethanol engine and the EEV limits has been presented collectively.

masy tworzonoego ozonu i masy niemetanowych węglowodorów. Porównano również emisję jednostkową dwutlenku węgla kopalnego w testach ETC i ESC z silnika DC9 E02 270 oraz z silnika o poziomie EEV, wykorzystując do tego celu wyniki badań wykonanych w Environment Canada.

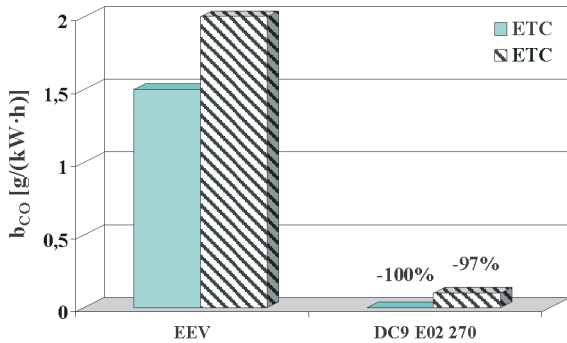


Fig. 3. Comparison of the EEV limits and the unit emission of carbon monoxide from the DC9 E02 270 engine in the ETC and ESC tests
Rys. 3. Porównanie limitów EEV i emisji jednostkowej tlenku węgla z silnika DC9 E02 270 w testach ETC i ESC

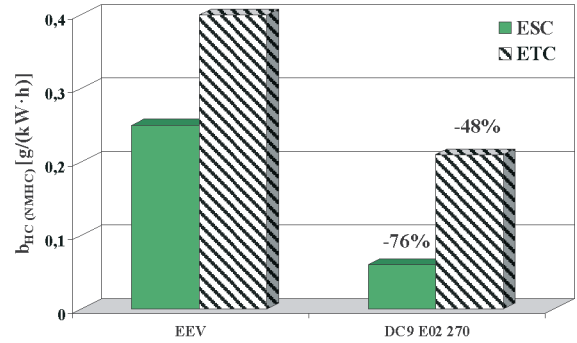


Fig. 4. Comparison of the EEV limits and the unit emission of hydrocarbons from the DC9 E02 270 engine in the ESC test and non-methane hydrocarbons in the ETC test
Rys. 4. Porównanie limitów EEV i emisji jednostkowej węglowodorów z silnika DC9 E02 270 w teście ESC i niemetanowych węglowodorów w teście ETC

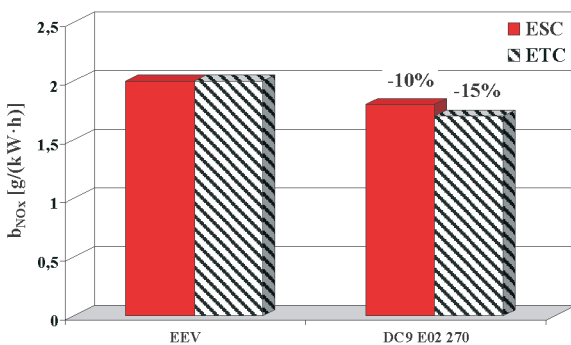


Fig. 5. Comparison of the EEV limits and the unit emission of NO_x from the DC9 E02 270 engine in the ETC and ESC tests
Rys. 5. Porównanie limitów EEV i emisji jednostkowej tlenków azotu z silnika DC9 E02 270 w testach ETC i ESC

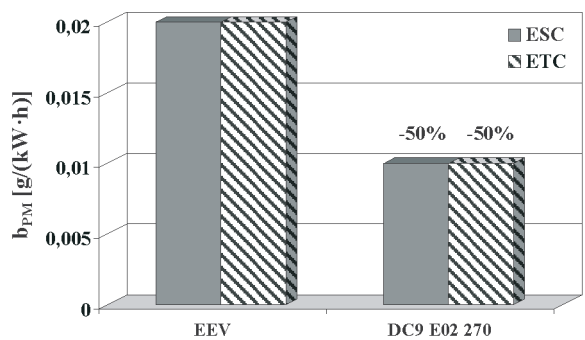


Fig. 6. Comparison of the EEV limits and the unit emission of PM from the DC9 E02 270 engine in the ETC and ESC tests
Rys. 6. Porównanie limitów EEV i emisji jednostkowej cząstek stałych z silnika DC9 E02 270 w testach ETC i ESC

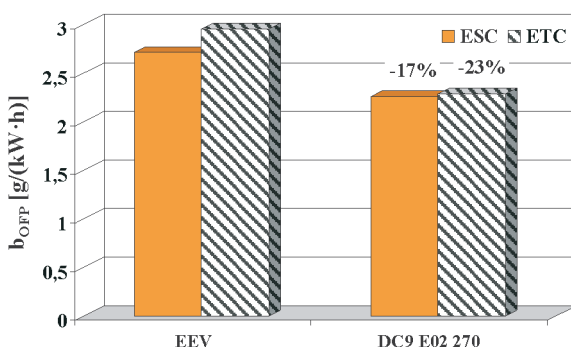


Fig. 7. Comparison of unit emission of potential tropospheric ozone, (EEV limits), and the emission of potential tropospheric ozone from the DC9 E02 270 engine in the ETC and ESC tests
Rys. 7. Porównanie emisji jednostkowej potencjalnego ozonu troposferycznego, wynikającej z limitów EEV, oraz emisji jednostkowej potencjalnego ozonu troposferycznego z silnika DC9 E02 270 w testach ETC i ESC

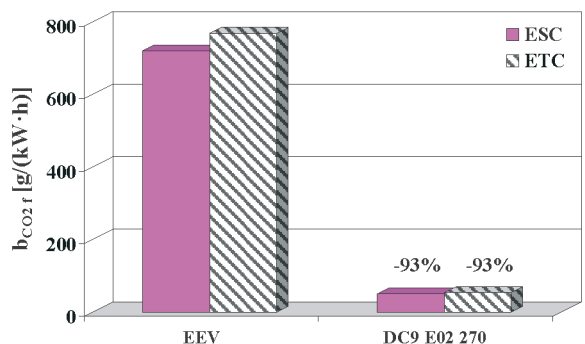


Fig. 8. Comparison of unit emission of carbon dioxide (EEV limits) and the emission from the DC9 E02 270 engine in the ETC and ESC tests
Rys. 8. Porównanie emisji jednostkowej dwutlenku węgla kopalnego z silnika o poziomie EEV oraz z silnika DC9 E02 270 w testach ETC i ESC

The comparison of the emissions has been performed against the EEV limits – the most stringent ecological standards to date, much more stringent than the Euro IV and Euro V standards. As for the forecasted Euro VI limits even the bioethanol engine does not meet the NO_x level requirements set forth therein. In order to reduce these emissions the application of SCR (*Selective Catalytic Reduction*) may be necessary [10].

Based on the test results of the engines fuelled with bioethanol we can formulate the following opinions as to the ecological consequences of the application of bioethanol E95 [3, 6–9, 11, 13–16]:

- a significant reduction of the emission of carbon monoxide,
- a significant reduction of the hydrocarbon emission,
- a significant reduction of the emission of polycyclic aromatic hydrocarbons,
- a reduction of NO_x ,
- a significant reduction of PM,
- the possibility of an increase in the emission of aldehydes,
- a reduction of the emission of sulfur compounds,
- a reduction in the emission of carbon dioxide in a closed cycle from well to wheels,
- a very good biodegradability.

The results of the emission tests of the engines fuelled with bioethanol indicate that these are currently the cleanest available engines in the market. Particularly precious seems the ability to reduce NO_x owing to a high evaporation heat of ethanol.

The simulation comparative tests performed based on the accessible data of the homologation results in terms of the emissions. The following solutions are under consideration:

- conventional bus fitted with a diesel engine Euro IV – PD–Euro IV,
- hybrid bus fitted with a diesel engine Euro IV H – PD–Euro IV,

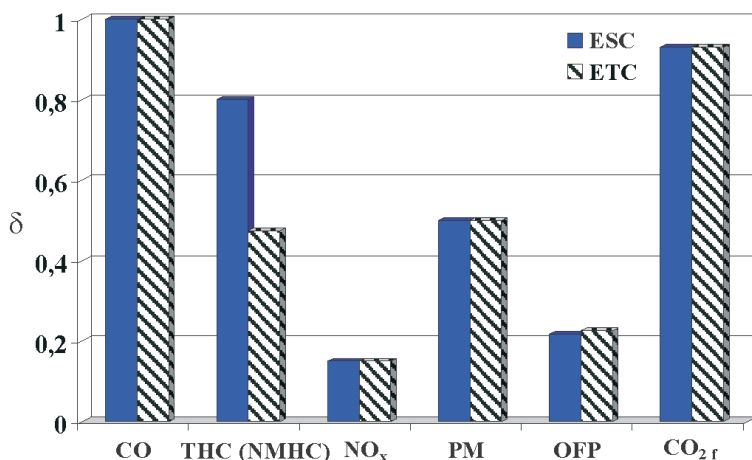


Fig. 9. The difference in the unit emissions from the bioethanol engine DC9 E02 270 and the EEV limits

Rys. 9. Różnica emisji jednostkowej zanieczyszczeń z silnika bioetanolowego DC9 E02 270 i limitów EEV

Wyniki badań porównawczych emisji jednostkowej zanieczyszczeń w testach ESC i ETC z silnika DC9 E02 270 przedstawiono na rys. 3–8. Na rysunkach naniesiono również różnicę względną emisji jednostkowej zanieczyszczeń z silnika DC9 E02 270 i limitów EEV.

Na wykresach są wyraźnie widoczne bardzo dobre właściwości ekologiczne silnika bioetanolowego ze względu na emisję zanieczyszczeń. Dodatkowo na rysunku 9 przedstawiono w sposób zbiorczy względną różnicę emisji jednostkowej zanieczyszczeń z silnika bioetanolowego i limitów EEV.

Porównania emisji zanieczyszczeń zostały wykonane w stosunku do limitów EEV – najwyższych obecnie wymagań ekologicznych, znacznie ostrzejszych od obowiązujących Euro IV oraz obowiązujących w przyszłości Euro V. W stosunku do planowanych do wprowadzenia limitów Euro VI nawet silnik bioetanolowy nie spełnia wymagań w zakresie emisji jednostkowej tlenków azotu. W celu zmniejszenia emisji tlenków azotu może być konieczne zastosowanie selektywnej redukcji katalitycznej SCR (*Selective Catalytic Reduction*) [10].

Na podstawie wyników badań silników spalinowych, zasilanych paliwami bioetanolowymi, można sformułować następujące opinie na temat ekologicznych skutków zastosowania paliwa bioetanolowego E95 [3, 6–9, 11, 13–16]:

- bardzo znaczne zmniejszenie emisji tlenku węgla,
- znaczne zmniejszenie emisji węglowodorów,
- znaczne zmniejszenie emisji wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych,
- zmniejszenie emisji tlenków azotu,
- bardzo znaczne zmniejszenie emisji cząstek stałych,
- możliwość zwiększenia emisji aldehydów,
- zmniejszenie emisji związków siarki,
- ograniczenie emisji dwutlenku węgla w zamkniętym cyklu powstawania i eksploatacji paliw,
- bardzo dobra degradowalność biologiczna.

Wyniki badań emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych zasilanych paliwami bioetanolowymi wskazują, że są to obecnie „najczystsze” silniki spośród znajdujących się na rynku. Szczególnie wartościowa jest możliwość ograniczenia emisji tlenków azotu dzięki m.in. dużemu ciepłu parowania etanolu.

Jak duży jest wpływ właściwości ekologicznych silnika spalinowego na właściwości całego autobusu, świadczą symulacyjne badania porównawcze, wykonane na podstawie dostępnych wyników badań homologacyjnych emisji zanieczyszczeń. Rozpatruje się następujące rozwiązania:

- autobus klasyczny z silnikiem na olej napędowy kategorii Euro IV – PD–Euro IV,
- autobus hybrydowy z silnikiem na olej napędowy kategorii Euro IV H – PD–Euro IV,
- autobus klasyczny z silnikiem na paliwo bioetanolowe E95 kategorii „ponad EEV” – E95,
- autobus hybrydowy z silnikiem na paliwo bioetanolowe E95 kategorii „ponad EEV” – H–E95.

Na rysunku 10 przedstawiono emisje jednostkowe zanieczyszczeń w przypadku roz-

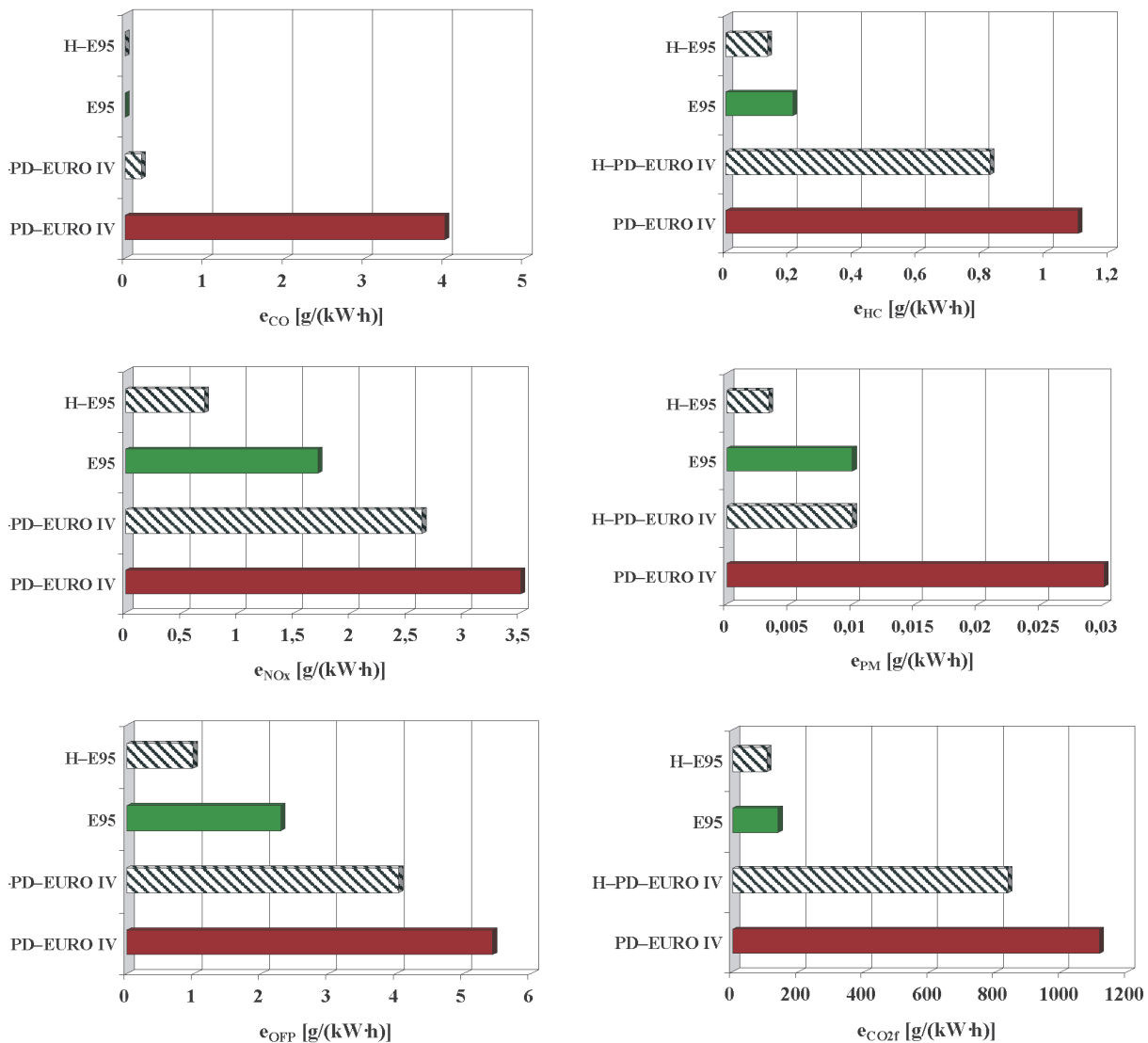


Fig. 10. Unit emissions for the bus drivetrains under consideration

Rys. 10. Emisje jednostkowe zanieczyszczeń dla rozpatrywanych napędów autobusów miejskich

- conventional bus fitted with a bioethanol E95 engine „higher than EEV” – E95,
- hybrid bus fitted with a bioethanol E95 engine „higher than EEV” – H-E95.

Figure 10 presents the unit emissions for the solutions under consideration in a dynamic ETC test.

It clearly shows that in relation to the conventional diesel engine the properties of the bioethanol engine provide a possibility of emission reduction that is higher than in the case of a hybrid vehicle.

4. Conclusions

The application of bioethanol fuels in combustion engines is treated as a very promising solution to the ecological and fuel related problems of engine operation. The experience in the tests and operation of combustion engines fuelled with bioethanol indicates that these engines are the most ecological solutions. Diesel engines fuelled with bioethanol E95 are currently applied in city buses only. This application

patrywanych rozwiązań napędów w warunkach pracy silnika spalinowego w dynamicznym teście homologacyjnym ETC.

Jest wyraźnie widoczne, że – w odniesieniu do klasycznego silnika na olej napędowy – właściwości samego silnika bioetanolowego dają możliwość zmniejszenia emisji zanieczyszczeń nawet większego niż przy zastosowaniu napędu hybrydowego.

4. Zakończenie

Zastosowanie paliw bioetanolowych do silników spalinowych jest obecnie traktowane jako bardzo obiecujące rozwiązanie problemów paliwowych i ekologicznych eksploatacji silników. Doświadczenia z badań i eksploatacji silników spalinowych zasilanych paliwami bioetanolowymi wskazują, że silniki te należą do najbardziej ekologicznych rozwiązań. Silniki o zapłonie samoczynnym zasilane paliwem bioetanolowym E95 znalazły do tej pory zastosowanie jedynie do napędu autobusów miejskich. Zastosowanie jest uzasadnione wysokimi wymaganiami ekologicznymi, ja-

is justified with very high ecological requirements for this means of public transportation most frequently operated in city centers where the environmental threats are particularly serious.

The analyses of the emissions from diesel engines and their conditions of operation in city buses indicate that bioethanol engines in city buses are a better solution in comparison to hybrid (diesel electric) vehicles. The most ecological solution in terms of exhaust emission is the combination of the advantages of bioethanol and hybrid vehicles. Such a vehicle already exists: in municipal public transportation it is a Scania city bus fitted with a DC9 E02 270 bioethanol engine E95 [11, 13, 15].

An important argument for the development of the bioethanol fuels is a very encouraging pricing policy in the EU, hence the use of these fuels is economical in light of the growing crude oil prices.

The trend in the use of bioethanol fuels is growing. Apart from city buses Scania is also developing a utility vehicle based on the same bioethanol E95 technology designed to operate as a vehicle for local city center transportation of goods. Scania is developing other bioethanol E95 vehicles as well.

Artykuł recenzowany

Bibliography/Literatura

- [1] Carter W.P.L.: Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 44, 1994.
- [2] Carter W.P.L.: Ozone reactivity analysis of emissions from motor vehicles. Air Pollution Research Center. University of California. 11.07.1989.
- [3] Chłopek Z.: Ecological aspects of using bioethanol fuel to power combustion engines. *Maintenance and Reliability*. Nr 3(35)2007.
- [4] Chłopek Z.: Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. *Prace Naukowe. Seria „Mechanika”*, z. 173. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [5] Chłopek Z.: Pojazdy samochodowe – ochrona środowiska naturalnego. WKiŁ, Warszawa 2002.
- [6] Chłopek Z.: Pollutants emission tests of the compression ignition engine powered by ethanol fuel E95. *Combustion Engines, Ignition&Combustion 2007–SC3*.
- [7] Chłopek Z.: Zastosowanie paliw bioetanolowych do zasilania silników spalinowych. Rozdział w monografii „Uwarunkowania ekorozwoju rekreacji i turystyki”. Wydawnictwo Naukowe Gabriel Borowski, Lublin 2008.
- [8] Chłopek Z.: Zastosowanie paliwa etanolowego do zasilania silników o zapłonie samoczynnym. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej* 3(66)/2007.
- [9] Cole R.L., Poola R.B., Sekar R., Schaus J.E., McPartlin P.: Effects of ethanol additives on diesel particulate and NOx emissions. SAE 2001-01-1937.
- [10] <http://www.dieselnet.com>.
- [11] <http://www.ethanolbus.com>.
- [12] <http://www.sekab.com>.
- [13] <http://www.scania.com>.
- [14] Johansson U.: Ethanol Buses – experiences and prospects for sustainable urban transport. Bioethanol and the road to sustainable transport. Imperial College. London March 22, 2006. BAFF – BioAlcohol Fuel Foundation. <http://www.baff.info/Filer/BioEthanolLondon>.
- [15] Scania AB – materiały niepublikowane.
- [16] Strömberg J.: Towards Sustainable Travel in Stockholm’s Public Transport. Bioethanol and the road to sustainable transport. Imperial College. London March 22, 2006. BAFF – BioAlcohol Fuel Foundation. <http://www.baff.info/Filer/BioEthanolLondon>.
- [17] Well-to-Wheel analysis of greenhouse gas emissions of automotive fuels in the Japanese context. Well-to-Tank Report. Toyota Motor Corporation. Mizuho Information & Research Institute. November 2004.
- [18] Well-to-Wheel evaluation for production of ethanol from wheat. A Report by the LowCVP Fuels Working Group, WTW Sub-Group FWG-P-04-024. October 2004.

Mr. Zdzisław Chłopek, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Vehicles and Working Machines at Warsaw University of Technology.

Dr hab. inż. Zdzisław Chłopek – profesor na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej.

e-mail: zdzislaw.chlopek@simr.pw.edu.pl

