

## Emisja dwutlenku węgla w aspekcie stosowanych paliw silnikowych

*W artykule poruszono zagadnienia związane z emisją dwutlenku węgla w spalinach, przy stosowaniu różnych paliw silnikowych. Przytoczono aktualnie obowiązujące normy emisji oraz propozycje nowych uregulowań prawnych w tym zakresie. Wymieniano współcześnie stosowane metody zmniejszenia emisji dwutlenku węgla z silników spalinowych, wśród których znaczącą pozycję zajmuje stosowanie nowych paliw. Przedstawiono schemat obliczeń emisji dwutlenku węgla. Następnie zaproponowano przyjęcie metody porównawczej dotyczącej emisji dwutlenku węgla powstającego w wyniku spalania różnych paliw, w której kryterium stanowi taki sam strumień energii doprowadzany do silnika w postaci mieszanki paliwowo-powietrznej. Przyjęty wskaźnik emisji pozwolił na porównanie wielkości emisji dwutlenku węgla przy zasilaniu silnika różnymi paliwami, w odniesieniu do emisji przy zasilaniu benzyną, i wyciągnięcie wniosków.*

*Słowa kluczowe: silnik spalinowy, emisja spalin, paliwa alternatywne, dwutlenek węgla, wartość opałowa*

### Carbon dioxide emissions in the aspect of applied engine fuels

*The article addresses some questions concerning the exhaust gas carbon dioxide emissions as a result of applying different kinds of engine fuels. The current exhaust emission regulations are provided in the article together with the new standards that have been proposed. In addition, the paper discusses some present methods applied to decrease carbon dioxide emissions from combustion engines, including the use of new fuels. The following part of the article provides a calculation procedure of carbon dioxide emissions and proposes a new comparative method of evaluating carbon dioxide emissions with respect to different fuels. The criterion for the comparison is the value of energy transfer as an air-fuel mixture to the engine. This coefficient of carbon dioxide emissions allows a comparison between emissions in the case of various fuels with reference to gasoline and to draw some conclusions.*

*Key words: combustion engine, emissions, alternative fuels, carbon dioxide, calorific value*

#### 1. Wstęp

Silniki spalinowe, stanowiące obecnie podstawowe źródło napędu środków transportu są jednym z głównych źródeł emisji dwutlenku węgla na świecie.

Samochody osobowe odpowiadają obecnie za 19% całkowitej emisji dwutlenku węgla na świecie. W krajach Unii Europejskiej szeroko rozumiany transport odpowiada za 28% emisji dwutlenku węgla do atmosfery, z czego 84% pochodzi z transportu drogowego, w czym ok. 50% udział mają samochody osobowe.

Limity emisji dwutlenku węgla zawarte są w tzw. Protokole z Kyoto, który jest międzynarodowym porozumieniem dotyczącym globalnego ocieplenia. Traktat został wynegocjowany w grudniu 1997 r. na konferencji zorganizowanej przez Ramową Konwencję Narodów Zjednoczonych dotyczącą Zmian Klimatycznych (*United Nations Framework Convention on Climate Change*), a wszedł w życie 16 lutego 2005 r.

Na mocy postanowień protokołu kraje, które ratyfikowały traktat, zobowiązały się do 2012 r. do redukcji o 5,2% emisji dwutlenku węgla i innych gazów powodujących efekt cieplarniany.

W latach 1998-1999 europejski przemysł motoryzacyjny dobrowolnie zobowiązał się do zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub> o jedną czwartą na przełomie lat 2008/2009, co odpowiada emisji z pojazdu 140 g/km. Wprawdzie nowe samochody w Europie emitują obecnie 12% CO<sub>2</sub> mniej niż pojazdy,

#### 1. Introduction

Combustion engines, which function nowadays as the basic propulsion source in means of transport, are one of the main sources of the world's carbon dioxide emissions.

Passenger cars account for 19% of the world's carbon dioxide emissions. In the European Union means of transport are responsible for 28% of the total carbon dioxide emissions to the atmosphere. Out of the whole level of carbon dioxide emissions in the EU countries 84% is caused by the road transport with the 50% share of passenger cars.

Carbon dioxide emission limitations are included in the so-called Kyoto Protocol, which is an international agreement concerning the global warming. The treaty negotiations were completed in December 1997 during the *United Nations Framework Convention on Climate Change* and came into force on 16<sup>th</sup> February, 2005.

Countries which ratified the treaty committed themselves to reduce greenhouse gases including carbon dioxide by 5.2% by the end of 2012.

In the years 1998-1999 the European automotive industry agreed to decrease CO<sub>2</sub> emissions by 25% at the turn of 2008/2009. This value corresponds to the CO<sub>2</sub> emission level of 140 g/km. New cars in Europe emit now 12% less CO<sub>2</sub> than those on the market in 1995. However, the pace of technological advancements is too slow to meet the new requirements.

In the year of 2007, the average carbon dioxide emissions from new cars was 163 g/km.

które trafiały na rynek w 1995 r., to jednak tempo zmian technologicznych jest zbyt małe, by producenci osiągnęli wyznaczony cel.

W roku 2007 emisja dwutlenku węgla w nowych samochodach oferowanych na rynku europejskim wynosiła średnio 163 g/km.

Nowa strategia Komisji Europejskiej z lutego 2007 r. przewiduje zmniejszenie emisji dwutlenku węgla w latach 2008-2009 przez nowe samochody do 125 g/km. Ponadto od 2012 r. średnia emisja CO<sub>2</sub> dla nowych samochodów osobowych w Europie nie powinna być większa niż 120 g/km, w tym 10 g/km ma być zaoszczędzone dzięki poprawie innych podzespołów samochodów niż silnik, np.: opony, energooszczędna klimatyzacja, większe użycie biopaliw, natomiast pozostałe efekty mają pochodzić bezpośrednio ze zmian w silnikach.

Na następne lata przewiduje się dalsze zmniejszenie emisji dwutlenku węgla: od 2020 r. 95 g/km, a od 2025 r. 70 g/km.

## 2. Metody zmniejszenia emisji dwutlenku węgla w motoryzacji

Do podstawowych metod zmniejszania emisji dwutlenku węgla w motoryzacji zaliczyć można:

- Zmniejszenie zużycia paliwa:
  - W silnikach z zapłonem iskrowym przez:
    - „Downsizing”
    - Bezpośredni wtrysk paliwa
    - Hybrydowe układy napędowe
  - W silnikach z zapłonem samoczynnym przez:
    - „Downsizing”
    - Wysokociśnieniowe systemy wtrysku paliwa
    - Doładowanie nowej generacji
- Wprowadzenie odnawialnych paliw ciekłych:
  - Biopaliwa dla silników ZI (alkohole)
  - Biopaliwa dla silników ZS (oleje roślinne, estry)
- Wprowadzenie paliw gazowych:
  - Gaz ziemny
  - Biogaz
  - Wodór
- Zastosowanie ogniwo paliwowych.

Wśród wymienionych metod znaczącą pozycję zajmuje wprowadzanie nowych paliw, których zastosowanie jest możliwe we współczesnych silnikach spalinowych bez ponoszenia dużych kosztów. W aspekcie zmniejszenia emisji dwutlenku węgla najbardziej interesujące są paliwa o małym udziale masowym węgla oraz paliwa odnawialne pochodzenia roślinnego. W tej grupie znajduje się coraz bardziej popularne na świecie paliwo E85 oraz alkohole, stosowane do zasilania silników z zapłonem iskrowym, oleje roślinne stosowane do zasilania silników z zapłonem samoczynnym oraz paliwa gazowe, stosowane w obu typach silników.

## 3. Obliczenie emisji dwutlenku węgla w spalinach

Głównymi składnikami elementarnymi najczęściej stosowanych paliw silnikowych, takich jak: benzyna, olej napędowy, alkohole oraz metan, są: węgiel – C, wodór H<sub>2</sub>, siarka

The new strategy of European Commission (2007) postulates a decrease of the carbon dioxide emissions from new cars to 125 g/km in the years 2008-2009. Furthermore, from 2012 the average CO<sub>2</sub> emissions from new cars should not exceed 120 g/km and 10 g/km out of this limitation will have to be saved owing to the improvement of the car components, other than the engine, i.e.: tyres, energy saving air conditioning, biofuels application. Engine modifications will have to account for the remaining part of the obligatory decrease.

It is predicted that from 2020 the engines will have to meet new CO<sub>2</sub> emission limitations which is 95 g/km and 70 g/km from 2025.

## 2. Methods of decreasing automotive CO<sub>2</sub> emissions

The automotive CO<sub>2</sub> emissions can be lowered via:

- Fuel consumption decrease in SI engines by means of:
  - „downsizing”
  - direct fuel injection
  - hybrid propulsion systems
- Fuel consumption decrease in Diesel engines by means of:
  - „downsizing”
  - high pressure fuel injection
  - new generation charging
- Introduction of renewable liquid fuels:
  - bio-fuels for SI engines (alcohols)
  - bio-fuels for Diesel engines (vegetable oils, esters)
- Introduction of gaseous fuels:
  - natural gas
  - bio-gas
  - hydrogen.
- Introduction of fuel cells.

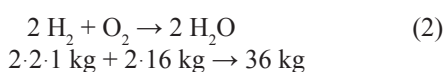
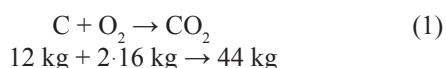
Among the above-mentioned methods an important item is the implementation of new fuels which are applicable in the contemporary combustion engines at a reasonable price. As far as the CO<sub>2</sub> emissions decrease is concerned, the attention is paid to the fuels with a low carbon mass share as well as to the renewable vegetable fuels. These fuels include: increasingly popular E85, alcohols applied in SI engines, vegetable fuels applied in Diesel engines and gaseous fuels applied in both types of engines.

## 3. The calculation procedure of the carbon dioxide emission in exhaust gases

Most frequently used engine fuels, such as gasoline, diesel fuel, alcohols or methane, are mainly composed of: carbon – C, hydrogen – H<sub>2</sub>, sulphur – S, oxygen – O<sub>2</sub>, water – H<sub>2</sub>O and the rest generally consists of ashes. The second reagent of combustion process is the air which consists of: nitrogen – N<sub>2</sub>, oxygen – O<sub>2</sub>, trace amounts of argon – Ar and carbon dioxide – CO<sub>2</sub>. Both sulphur and water constitute undesirable engine fuel components. The rest of composition occurs as ashes usually in the trace amount. In consequence, only carbon and hydrogen are considered as the fuel components while calculating emissions, whereas the air contents become limited to nitrogen and oxygen.

– S, tlen – O<sub>2</sub>, woda – H<sub>2</sub>O i reszta, składająca się głównie z popiołów. Drugim reagentem procesu spalania jest powietrze zawierające: azot – N<sub>2</sub>, tlen – O<sub>2</sub> oraz śladowe ilości argonu – Ar i dwutlenku węgla CO<sub>2</sub>. Zarówno siarka, jak i woda są niepożądanymi składnikami paliw silnikowych, natomiast reszta składu w postaci popiołów występuje w śladowych ilościach. W związku z tym do obliczeń jako składniki paliwa przyjmuje się zwykle wyłącznie węgiel i wodór, natomiast skład powietrza ogranicza się do azotu i tlenu.

Przy założeniu całkowitego i zupełnego spalania składniki paliwa teoretycznie łączą się z tlenem, tworząc produkty spalania: CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O, według następujących stosunków masowych:



Z powyższych wzorów wynika, że podczas spalania za tworzenie dwutlenku węgla odpowiedzialny jest tylko węgiel zawarty w paliwie.

Ze wzoru (1) wynika, że z 1 kg węgla otrzymujemy 44/12 kg CO<sub>2</sub>.

Ponieważ 1 kmol gazu w warunkach normalnych zajmuje objętość 22,4 Nm<sup>3</sup>, więc objętość właściwa CO<sub>2</sub> w warunkach normalnych wynosi 22,4/44 Nm<sup>3</sup>/kg, w związku z tym dwutlenek węgla otrzymany ze spalania 1 kg węgla będzie miał objętość (44/12) · (22,4/44) Nm<sup>3</sup>/kg = 1,87 Nm<sup>3</sup>/kg.

Oznaczając udział masowy węgla w 1 kg paliwa symbolem c<sub>p</sub>, po jego spalaniu otrzymamy 1,87 · c<sub>p</sub> Nm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>/kg paliwa.

W związku z tym:

- ze spalania 1 kg benzyny silnikowej, w której udział masowy węgla c<sub>p</sub> = 0,85, a wodoru h<sub>p</sub> = 0,15, otrzymamy 1,59 Nm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>,
- ze spalania 1 kg oleju napędowego, w którym udział masowy węgla c<sub>p</sub> = 0,86 i wodoru h<sub>p</sub> = 0,16, otrzymamy 1,61 Nm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>,
- dla alkoholu etylowego o wzorze sumarycznym C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH: masa cząsteczkowa C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH wynosi: 2 · 12 + 5 · 1 + 16 + 1 = 46, a udział węgla c<sub>p</sub> = 24/46 = 0,522.

W związku z tym ze spalania 1 kg alkoholu etylowego otrzymamy 0,976 Nm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>.

- dla alkoholu metylowego o wzorze sumarycznym CH<sub>3</sub>OH: masa cząsteczkowa CH<sub>3</sub>OH wynosi: 12 + 3 · 1 + 16 + 1 = 32, a udział węgla c<sub>p</sub> = 12/32 = 0,375.

W związku z tym ze spalania 1 kg alkoholu metylowego otrzymamy 0,701 Nm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>.

- dla metanu CH<sub>4</sub> masa cząsteczkowa wynosi: 12 + 4 · 1 = 16, a udział węgla c<sub>p</sub> = 12/16 = 0,75.

W związku z tym ze spalania 1 kg metanu otrzymamy 1,4 Nm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>.

Dla metanu, który jest paliwem gazowym, wygodniej jest posługiwać się objętością, w związku z tym można wyliczyć jego objętość właściwą:

Should the fuel combustion be total and complete, theoretically, the fuel components combine with oxygen creating CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O as the products of combustion, accordingly to the mass ratios, Eq. 1 and 2.

On the basis of the above formulas it can be concluded that during combustion only carbon included in the fuel accounts for carbon dioxide formation.

Formula (1) shows that 44/12 kg CO<sub>2</sub> can be obtained from 1 kg carbon.

In the standard conditions 1 kmol gas occupies the volume of 22.4 Nm<sup>3</sup>, hence the specific volume of CO<sub>2</sub> in the standard conditions amounts to 22,4/44 Nm<sup>3</sup>/kg.

The volume of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) obtained from the combustion of 1 kg carbon will equal.

Burning the carbon mass share in 1 kg fuel, marked as c<sub>p</sub>, allows obtaining 1,87 · c<sub>p</sub> Nm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>/kg.

Hence:

- combustion of 1 kg gasoline, in which the carbon mass share c<sub>p</sub> = 0.85 and the hydrogen mass share c<sub>H</sub> = 0.15 gives 1.59 Nm<sup>3</sup> of CO<sub>2</sub>
- combustion of 1 kg Diesel fuel, in which the carbon mass share c<sub>p</sub> = 0.86 and the hydrogen mass share c<sub>H</sub> = 0.16 gives 1.61 Nm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>
- in the case of ethyl alcohol C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, the molecule mass amounts to 2 · 12 + 5 · 1 + 16 + 1 = 46 and the carbon share equals c<sub>p</sub> = 24/46 = 0,522, consequently, the outcome of burning 1 kg of ethyl alcohol is 0.976 Nm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>
- in the case of methyl alcohol CH<sub>3</sub>OH, the molecule mass amounts to 12 + 3 · 1 + 16 + 1 = 32 and the carbon share equals c<sub>p</sub> = 12/32 = 0,375, consequently, burning 1 kg of methyl alcohol results in releasing 0.701 Nm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>
- Methane CH<sub>4</sub> is a gaseous sort of fuel, hence it is more convenient to use the volume in calculation rather than the mass. In consequence, its specific volume amounts to v<sub>CH<sub>4</sub></sub> = 22,4/16 Nm<sup>3</sup>/kg = 1,4 Nm<sup>3</sup>/kg which means that burning 1 Nm<sup>3</sup> methane gives 1 Nm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>.

#### 4. Carbon dioxide emissions with regard to different fuels burnt in the combustion engine

Calculated values concern theoretically possible carbon dioxide emissions that arise from combustion of the mass either the volume unit of fuel but do not take into consideration the operation conditions specific to a combustion engine. As far as the applicability of a particular fuel for feeding the engine is concerned, an essential feature of an air-fuel mixture is the energy transfer to the cylinder. Additionally, the energy transfer functions as an important parameter which should be considered while analysing carbon dioxide emissions. Therefore, since the efficiency of energy conversion is alike in the engine, any comparisons of carbon dioxide emissions can be regarded valid providing the same amount of energy transfer as an air-fuel mixture becomes supplied to the engine.

The calorific value of a fuel (W<sub>p</sub>) containing flammable components such as carbon C, hydrogen H<sub>2</sub> and sulphur S can be calculated on the grounds of its chemical composi-

$v_{\text{CH}_4} = 22,4/16 \text{ Nm}^3/\text{kg} = 1,4 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ , czyli ze spalania  $1 \text{ Nm}^3$  metanu otrzymamy  $1 \text{ Nm}^3 \text{ CO}_2$ .

#### 4. Emisja dwutlenku węgla ze spalania różnych paliw w silniku spalinowym

Wyliczone wielkości dotyczą teoretycznie możliwej emisji dwutlenku węgla powstałego ze spalania jednostki masy lub objętości paliwa, natomiast nie uwzględniają specyfiki pracy silnika spalinowego. Z punktu widzenia przydatności danego paliwa do zasilania silników spalinowych istotną rolę odgrywa strumień energii zawartej w mieszance doprowadzonej do silnika. Jest to również ważny parametr, który powinien być uwzględniany przy wszelkich analizach dotyczących emisji dwutlenku węgla. W tym wypadku, zakładając podobną sprawność przetwarzania energii w silniku, wszelkie porównania emisji dwutlenku węgla powstającego w wyniku spalania różnych paliw powinny dotyczyć przypadku, w którym do silnika doprowadzany jest taki sam strumień energii w postaci mieszanki paliwo-powietrznej.

Wartość opałową  $W_p$  paliwa, którego palnymi składnikami są: węgiel C, wodór H<sub>2</sub> oraz siarka S, można obliczyć, znając jego skład chemiczny i masowy udział poszczególnych składników: węgla  $c_p$ , wodoru  $h_p$ , siarki  $s_p$ , tlenu  $o_p$  i wody  $w_p$  [2]:

$$W_p = 3,39 \cdot c_p + 12,41 \left( h_p - \frac{o_p}{8} \right) + 1,05s_p - 0,25 \left( w_p + w_p \right) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (3)$$

Przy założeniu, że w składzie paliwa brak jest wody ( $w_p = 0$ ) oraz siarki ( $s_p = 0$ ) otrzymujemy dla rozpatrywanych paliw następujące wartości opałowe:

- dla benzyny o udziale masowym węgla  $c_p = 0,85$  i wodoru  $h_p = 0,15$   $W_p = 44055 \text{ kJ/kg}$
- dla oleju napędowego o udziale masowym węgla  $c_p = 0,86$  i wodoru  $h_p = 0,14$   $W_p = 43378 \text{ kJ/kg}$
- dla alkoholu etylowego C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH  $W_p = 25510 \text{ kJ/kg}$
- dla alkoholu metylowego CH<sub>3</sub>OH  $W_p = 17662 \text{ kJ/kg}$
- dla metanu CH<sub>4</sub>  $W_p = 50825 \text{ kJ/kg}$  lub  $W_p = 36303 \text{ kJ/Nm}^3$

W ostatnim okresie coraz popularniejsze staje się paliwo oznaczone symbolem E85, które jest mieszaniną zawierającą 85% objętości alkoholu uzyskiwanego z przeróbki biomasy i 15% objętości benzyny silnikowej.

Przy założeniu, że stosowany w tym paliwie alkohol jest czystym alkoholem etylowym o gęstości  $\rho_{20} = 0,7893 \text{ g/cm}^3$ , a benzyna ma średnią gęstość  $\rho_{20} = 0,75 \text{ g/cm}^3$ , otrzymamy paliwo o gęstości  $\rho_{20} = 0,783 \text{ g/cm}^3$  i wartości opałowej  $W_p = 28181 \text{ kJ/kg}$ .

Ponieważ najczęściej stosowanym paliwem do zasilania silników spalinowych jest benzyna, dlatego przy obliczeniu strumienia energii doprowadzonej do silnika jako wielkość odniesienia najwygodniej jest przyjąć energię uzyskaną ze spalania 1 kg benzyny. Podczas zasilania silnika różnymi paliwami przyjęto założenie takiej samej sprawności przetwarzania energii. Przy takim założeniu można wyliczyć

and mass share of particular components i.e. carbon  $c_p$ , hydrogen  $h_p$ , sulphur  $s_p$ , oxygen  $o_p$  and water  $w_p$  [2] according to Eq. 3.

Assuming that there is no water ( $w_p = 0$ ) and sulphur ( $s_p = 0$ ) in a fuel, the calorific values for various fuels are as follows:

- for gasoline with carbon mass shares  $c_p = 0.85$  and hydrogen  $c_H = 0.15$ :  $W_p = 44,055 \text{ kJ/kg}$
- for Diesel fuel with carbon mass shares  $c_p = 0.86$  and hydrogen  $c_H = 0.14$ :  $W_p = 43,378 \text{ kJ/kg}$
- for ethyl alcohol C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH:  $W_p = 25,510 \text{ kJ/kg}$
- for methyl alcohol CH<sub>3</sub>OH:  $W_p = 17,662 \text{ kJ/kg}$
- for methane CH<sub>4</sub>:  $W_p = 50,825 \text{ kJ/kg}$  or  $W_p = 36,303 \text{ kJ/Nm}^3$ .

Recently, the fuel marked as E85 has become quite widespread. It consists of alcohol made from biomass (85%) and gasoline (15%).

Supposing that the fuel comprises of pure ethyl alcohol with density  $\rho_{20} = 0,7893 \text{ g/cm}^3$  with the gasoline density  $\rho_{20} = 0,75 \text{ g/cm}^3$ , then the fuel density equals  $\rho_{20} = 0,783 \text{ g/cm}^3$  and its calorific value  $W_p = 28181 \text{ kJ/kg}$ .

Due to the fact that gasoline is the most frequently used fuel for feeding combustion engines, it is most convenient for calculating the energy transfer to assume the value of energy obtained through burning 1 kg gasoline as the point of reference. Moreover, it was assumed that the energy conversion efficiency does not vary irrespectively to the fuel supplied to the engine. Thus, the fuel mass can be calculated owing to the value of the energy transfer during combustion which equals the amount of energy released through burning 1 kg of gasoline. Following, carbon dioxide emissions can be calculated on the basis of the carbon dioxide emissions resulting from burning 1 kg of gasoline.

For gasoline:

Combustion of 1 kg gasoline releases 44,055 kJ energy and 1.59 Nm<sup>3</sup> carbon dioxide.

For diesel fuel:

Combustion of 1 kg diesel fuel releases 43,378 kJ energy and 1.61 Nm<sup>3</sup> carbon dioxide. In order to equal the energy released through burning 1 kg gasoline, 1.016 kg diesel fuel should be burnt; as a result, 1.64 Nm<sup>3</sup> carbon dioxide becomes released.

For ethyl alcohol:

Combustion of 1 kg ethyl alcohol releases 25,510 kJ energy and carbon dioxide emissions amount to 0.976 Nm<sup>3</sup>. In order to equal the energy released through burning 1 kg gasoline, 1.73 kg ethyl alcohol should be burnt; as a result, 1.69 Nm<sup>3</sup> carbon dioxide becomes released.

For methyl alcohol:

Combustion of 1 kg methyl alcohol releases 17,662 kJ energy and carbon dioxide emissions amount to 0.701 Nm<sup>3</sup>. In order to equal the energy released through burning 1 kg gasoline, 2.49 kg methyl alcohol should be burnt; as a result, 1.75 Nm<sup>3</sup> carbon dioxide becomes released.

For methane:

Combustion of 1 kg methane releases 50,825 kJ energy and carbon dioxide emissions amount to 1.4 Nm<sup>3</sup>. In order to equal the energy released through burning 1 kg gasoline,

masę danego paliwa, którego spalanie daje energię równą energii uzyskanej ze spalania 1 kg benzyny, a następnie wyliczyć emisję dwutlenku węgla, również w odniesieniu do emisji powstałej ze spalania 1 kg benzyny.

Dla benzyny silnikowej:

Ze spalania 1 kg benzyny otrzymujemy 44055 kJ energii i emisję dwutlenku węgla wynoszącą 1,59 Nm<sup>3</sup>.

Dla oleju napędowego:

Ze spalania 1 kg oleju napędowego otrzymujemy 43378 kJ energii i emisję dwutlenku węgla wynoszącą 1,61 Nm<sup>3</sup>. Aby otrzymać energię równą energii uzyskanej ze spalania 1 kg benzyny, należy spalić 1,016 kg oleju napędowego, czego skutkiem jest emisja dwutlenku węgla wynosząca 1,64 Nm<sup>3</sup>.

Dla alkoholu etylowego:

Ze spalania 1 kg alkoholu etylowego otrzymujemy 25510 kJ energii i emisję dwutlenku węgla wynoszącą 0,976 Nm<sup>3</sup>. Aby otrzymać energię równą energii uzyskanej ze spalania 1 kg benzyny, należy spalić 1,73 kg tego paliwa, czego skutkiem jest emisja dwutlenku węgla wynosząca 1,69 Nm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>.

Dla alkoholu metylowego:

Ze spalania 1 kg alkoholu metylowego otrzymujemy 17662 kJ energii i emisję dwutlenku węgla wynoszącą 0,701 Nm<sup>3</sup>. Aby otrzymać energię równą energii uzyskanej ze spalania 1 kg benzyny, należy spalić 2,49 kg tego paliwa, czego skutkiem jest emisja dwutlenku węgla wynosząca 1,75 Nm<sup>3</sup>.

Dla metanu:

Ze spalania 1 kg metanu otrzymujemy 50825 kJ energii i emisję dwutlenku węgla wynoszącą 1,4 Nm<sup>3</sup>. Aby otrzymać energię równą energii uzyskanej ze spalania 1 kg benzyny, należy spalić 0,867 kg tego paliwa, czego skutkiem jest emisja dwutlenku węgla wynosząca 1,21 Nm<sup>3</sup>.

Dla paliwa E85:

Ze spalania 1 kg paliwa E85 otrzymujemy 28181 kJ energii. Zakładając, że emisja dwutlenku węgla ze spalania tego paliwa jest sumą emisji powstałej ze spalania jego składników, ze spalania 1 kg E85 otrzymamy emisję dwutlenku węgla wynoszącą 1,06 Nm<sup>3</sup>. Aby otrzymać energię równą energii uzyskanej ze spalania 1 kg benzyny, należy spalić 1,563 kg tego paliwa, czego skutkiem jest emisja dwutlenku węgla wynosząca 1,65 Nm<sup>3</sup>.

Emisję dwutlenku węgla z silnika zasilanego danym paliwem w odniesieniu do emisji podczas zasilania benzyną wyrażono wskaźnikiem emisji  $w_{CO_2}$ . Pozwala on na ocenę przydatności danego paliwa w aspekcie emisji dwutlenku węgla w stosunku do przyjętego wzorca. Wskaźnik ten obliczono według wzoru:

$$w_{CO_2} = \frac{E_{pCO_2}}{E_{bCO_2}} \cdot 100\% \quad (4)$$

gdzie:  $w_{CO_2}$  – wskaźnik emisji dwutlenku węgla,  $E_{pCO_2}$  – emisja dwutlenku węgla podczas zasilania silnika danym paliwem,  $E_{bCO_2}$  – emisja dwutlenku węgla podczas zasilania silnika benzyną.

0.867 kg methane should be burnt; as a result, 1.21 Nm<sup>3</sup> carbon dioxide becomes released.

For E85 gasoline:

Combustion of 1 kg E85 fuel releases 28,181 kJ energy. Assuming that carbon dioxide emissions that resulted from E85 combustion are the sum of emissions caused by burning its components, the outcome of burning 1 kg E85 is 1.06 Nm<sup>3</sup> carbon dioxide. So as to equal the energy released through burning 1 kg gasoline, 1.563 kg E85 gasoline should be burnt; as a result, carbon dioxide emissions amount to 1.65 Nm<sup>3</sup>.

With reference to the carbon dioxide emissions caused by burning gasoline, carbon dioxide emissions from the engine fed with a particular fuel are represented by emission factor  $w_{CO_2}$ . This factor enables the evaluation of usefulness of a given fuel in the aspect of carbon dioxide emissions in comparison to the established limitations. Emission factor  $w_{CO_2}$  is calculated according to the Eq. 4, where:  $w_{CO_2}$  – CO<sub>2</sub> emission factor,  $E_{pCO_2}$  – CO<sub>2</sub> emissions while feeding the engine with a given fuel,  $E_{bCO_2}$  – CO<sub>2</sub> emissions while feeding the engine with gasoline.

For gasoline:	$w_{CO_2} = 100.00\%$
For diesel fuel:	$w_{CO_2} = 103.14\%$
For ethyl alcohol:	$w_{CO_2} = 106.29\%$
For methyl alcohol:	$w_{CO_2} = 110.06\%$
For methane:	$w_{CO_2} = 76.1\%$
For E85 gasoline:	$w_{CO_2} = 103.77\%$

## 5. Conclusions

The comparison of carbon dioxide emissions obtained through burning different fuels is of theoretical nature and ignores many factors related to the specific engine customization and engine operation. For instance, the assumption of the similar energy conversion efficiency for different fuels is theoretical to a large extent; nevertheless, it enables a preliminary evaluation of fuel in the light of carbon dioxide emissions.

The results have shown that methane is the only widespread engine fuel which significantly decreases carbon dioxide emissions in comparison to gasoline feeding. Because of that in many developed countries this alternative type of fuel (mainly in the shape of high-methane natural gas) is preferred by law, and therefore, subject to different tax reductions.

A separate issue is the application of vegetable fuels to engine feeding. These are generally alcohols, applied to spark ignition engines and different kinds of vegetable oils or their esters applied to Diesel engines. As the above considerations showed, applying pure alcohols or alcohols mixed with gasoline (E85 fuel) leads to an increase in carbon dioxide emissions in comparison to gasoline feeding. The similar result occurs in the case of Diesel engines fed with vegetable oils. It is difficult to carry out a theoretical analysis for those kinds of fuels because of their complex chemical composition. The experimental works, proceeded according to the NEDC test, showed about 12% increase of carbon dioxide emissions in comparison to the standard Diesel oil

Dla benzyny:	$w_{\text{CO}_2} = 100,00\%$
Dla oleju napędowego:	$w_{\text{CO}_2} = 103,14\%$
Dla alkoholu etylowego:	$w_{\text{CO}_2} = 106,29\%$
Dla alkoholu metylowego:	$w_{\text{CO}_2} = 110,06\%$
Dla metanu:	$w_{\text{CO}_2} = 76,1\%$
Dla paliwa E85:	$w_{\text{CO}_2} = 103,77\%$

## 5. Wnioski

Przeprowadzone porównanie emisji dwutlenku węgla dokonane dla różnych paliw ma charakter teoretyczny i nie uwzględnia wielu czynników związanych z rodzajem konstrukcji i specyfiką pracy silnika, przy czym największym uproszczeniem było założenie jednakowej sprawności przetwarzania energii. Niemniej pozwala to na wstępną ocenę paliwa w aspekcie wielkości emisji dwutlenku węgla.

Wyniki analizy wykazały, że jedynym, powszechnie stosowanym paliwem silnikowym, którego stosowanie przynosi znaczne zmniejszenie emisji dwutlenku węgla w stosunku do zasilania silnika benzyną jest metan. Z tego względu w wielu krajach rozwiniętych ten typ paliwa (głównie w postaci wysokometanowego gazu ziemnego) w zastosowaniu do zasilania pojazdów jest często ustawowo preferowany, podlegając różnego typu ulgom finansowym.

Odrębnym zagadnieniem jest stosowanie do zasilania silników paliw pochodzenia roślinnego. Są to głównie alkohole stosowane do zasilania silników o zapłonie iskrowym oraz różnego typu oleje roślinne lub ich estry stosowane do zasilania silników o zapłonie samoczynnym. Jak wykazały powyższe rozważania, ich stosowanie w postaci czystej (alkohole) lub też w postaci zmieszanej z benzyną (paliwo E85) przynosi zwiększenie emisji dwutlenku węgla, w stosunku do zasilania benzyną. Podobny efekt występuje przy zasilaniu silników o zapłonie samoczynnym olejami roślinnymi. Dla tego typu paliw przeprowadzenie analizy teoretycznej jest trudne ze względu na złożony skład chemiczny, lecz badania doświadczalne przeprowadzone w teście NEDC podczas zasilania silnika estrem metylowym oleju rzepakowego wykazują ok. 12-procentowy wzrost emisji dwutlenku węgla w stosunku do zasilania standardowym olejem napędowym [3].

Wymienione paliwa zaliczone są jednak do grupy paliw odnawialnych, które są regenerowane w przyrodzie w procesach asymilacji i fotosyntezy. Należy przy tym pamiętać, co wykazały badania naukowe, że średni czas życia pojedynczej cząsteczki dwutlenku węgla powstałej w wyniku spalania, wynosi od kilkudziesięciu do nawet dwustu lat. Wynika to z tego, że znacząca część dwutlenku węgla krąży w tym czasie w przyrodzie, a głównie jest absorbowana przez wodę morską. Oznacza to, że wymienione procesy regeneracji odbywają się w czasie życia nawet kilku pokoleń i nie rozwiązują bieżących problemów związanych z efektem cieplarnianym.

W tym kontekście jedynym paliwem stosowanym do zasilania silników spalinowych, które spełnia oczekiwania dotyczące emisji gazów cieplarnianych, może być wyłącznie wodór, którego produktem spalania, według wzoru (2), jest woda.

feeding [3] if the engine was fed with the rapeseed methyl ester. Nonetheless, the above-mentioned fuels are classified as renewable fuels, which are naturally restored during photosynthesis and assimilation processes. One should remember that the average lifetime of each carbon dioxide molecule that arises from combustion lasts from several to even two hundred years. That phenomenon results from the fact that a considerable amount of carbon dioxide circulates during this time in nature and is mainly absorbed by the sea water. This means that the natural restoration processes, mentioned above, may continue even over several generations, and thus, they fail to solve the current problems connected with the greenhouse effect.

Therefore, it is clear that hydrogen appears to be the only fuel applied to feeding combustion engines which lives up to the expectations concerning the greenhouse gas emissions.

*Artykuł recenzowany*

## Skróty i oznaczenia/Abbreviations and Nomenclature

$p$	masowy udział węgla w paliwie/carbon mass share in the fuel
$E_{\text{pCO}}$	emisja dwutlenku węgla podczas zasilania silnika danym paliwem/carbon dioxide emissions while feeding the engine with a particular fuel
$E_{\text{bCO}}$	emisja dwutlenku węgla podczas zasilania silnika benzyną/carbon dioxide emissions while feeding the engine with gasoline
$h_p$	masowy udział wodoru w paliwie/hydrogen mass share in the fuel
NEDC	europejski test jezdny/European drive test
$o_p$	masowy udział tlenu w paliwie/an oxygen mass share in the fuel
$\rho_{20}$	gęstość w temperaturze 20°C/density at 20°C
$s_p$	masowy udział siarki w paliwie/sulphur mass share in the fuel
$w_p$	masowy udział wody w paliwie/water mass share in the fuel
$w_{\text{CO}_2}$	wskaźnik emisji dwutlenku węgla/carbon dioxide emission factor
$W_p$	wartość opałowa/calorific value
Ar	argon/argon
C	węgiel/carbon
CO <sub>2</sub>	dwutlenek węgla/carbon dioxide
CH <sub>3</sub> OH	alkohol metylowy/methyl alcohol
CH <sub>4</sub>	metan/methane
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	alkohol etylowy/ethyl alcohol
H <sub>2</sub>	wodór/hydrogen
H <sub>2</sub> O	woda/water
N <sub>2</sub>	azot/nitrogen
O <sub>2</sub>	tlon/oxygen
S	siarka/sulphur

**Literatura/Bibliography**

1. Brzeżański M.: Współczesne metody zmniejszania emisji dwutlenku węgla w motoryzacji, XV Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe – Motoryzacyjne Problemy Ochrony Środowiska, 7.12.2007.
2. Dowkonnt J., Teoria silników cieplnych, WKiŁ, Warszawa 1973.

3. Szlachta Z., Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi, WKiŁ, Warszawa 2002.

Dr hab. inż. Marek Brzeżański – adiunkt w Instytucie Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej.

*Mr. Marek Brzeżański, DSc. PhD. MEng. – Institute of Automobiles and Internal Combustion Engines, Cracow University of Technology.*

