

Current status and prospects for the use of low-carbon gaseous fuels in transport

The paper presents a detailed analysis of the issues related to an improvement of the efficiency of energy conversion in SI engines, fueled by low-carbon gaseous fuels. The research was conducted on an engine fueled with natural gas (CNG) and methane/hydrogen blends. The applied gaseous fuels are characterized by a reduced share of carbon, which enables a reduction of the emission of CO₂. The object of the research was a 1.6 dm³, 4-cylinder engine originally fitted in Opel Astra F. The engine was equipped with a CNG injection system. The final analysis includes the influence of the ignition advance angle and fuel composition on the engine performance and exhaust gas composition.

Key words: CNG, methane-hydrogen blends, CO₂ emission, SI engine

Stan obecny i perspektywy wykorzystania niskowęglowych paliw gazowych w transporcie

W artykule przedstawiono szczegółową analizę zagadnień związanych z poprawą efektywności konwersji energii w silniku ZI, zasilanym niskowęglowymi paliwami gazowymi. W przeprowadzonych badaniach stanowiskowych silnik zasilano gazem ziemnym (CNG) oraz mieszaninami metanu z wodorem. Wykorzystane mieszaniny metanowo-wodorowe cechuje obniżony udział węgla, co daje możliwość zmniejszenia emisji CO₂ jako produktu spalania. Obiektem badań był 4-cylindrowy silnik o pojemności 1,6 dm³, zamontowany fabrycznie w samochodzie Opel Astra F. Jednostkę napędową wyposażono w alternatywną instalację zasilania wtryskowego CNG. W analizie końcowej określono wpływ składu paliwa gazowego na podstawowe wskaźniki pracy silnika i skład emitowanych spalin.

Słowa kluczowe: CNG, mieszaniny metanowo-wodorowe, emisja CO₂, silnik ZI

1. Introduction

A research problem increasingly addressed these days is the reduction of the negative effect of transport on the environment. This problem comprises a wider range of other issues and tasks including such that aim at increasing the energy efficiency and reduction of the emission of CO₂. Carbon dioxide is not a toxic gas but it belongs to a group referred to as greenhouse gases and its emission mainly depends on the mass share of carbon in the fuel, the calorific value of the fuel and the overall efficiency of the energy converter. Research on alternative fuels has been conducted for many years and the criteria that these fuels must meet have already been well defined [1, 2]. One of the fundamental criteria is the emission of CO₂ calculated for the fuel life cycle (LCA) or determined exclusively as a natural product of complete combustion of carbon in the fuel.

A measure of the emission of greenhouse gases, also used in Poland, is the CO₂ emission index (fuel life cycle allowed for). It is expressed as a CO₂ equivalent per unit of energy (gCO₂e/MJ) or per 1 km. Example values of this index have been shown in Table 1.

Analyses and investigations carried out by both American EPA and European CONCAWE as well as many years of research conducted by the authors of this paper have shown that, compared to gasoline and diesel fuel, natural gas has a much greater potential to reduce greenhouse gases. When comparing the emission of greenhouse gases from fossil fuels and those from natural gas it turns out that it reduces this emission by 24% compared to gasoline, while in the case of LPG it is only 14%. An addition of 20% biomethane (renewable gas) to natural gas guarantees a 39% reduction

1. Wprowadzenie

Istotną obecnie problematyką badawczą jest ograniczenie negatywnego oddziaływania środków transportu na środowisko. Ta bardzo szeroka w swym zakresie problematyka obejmuje wiele zadań, w tym także te, których celem jest zarówno zwiększenie efektywności przetwarzania energii, jak i zmniejszenie emisji CO₂. Dwutlenek węgla nie jest gazem toksycznym, należy jednak do grupy nazwanej gazami cieplarnianymi, a jego emisja zależy przede wszystkim od udziału masowego węgla w paliwie, wartości opałowej paliwa oraz sprawności ogólnej konwertera energii. Badania nad wykorzystaniem paliw alternatywnych są realizowane od wielu lat, więc kryteria, które muszą spełniać te paliwa oraz systemy ich spalania zostały jednoznacznie zdefiniowane [1, 2]. Jednym z podstawowych kryteriów jest emisja CO₂, określana dla cyklu życia paliwa (LCA) lub wyłącznie jako naturalny produkt zupełnego spalania węgla zawartego w paliwie.

Miarą emisji gazów cieplarnianych, wykorzystywaną również w naszym kraju, jest wyznaczony, przy uwzględnieniu cyklu życia paliwa, wskaźnik emisji CO₂, wyrażany jako masa ekwiwalentu CO₂ na jednostkę energii, gCO₂e/MJ lub na 1 km. Przykładowe wartości tego wskaźnika przedstawiono w tabeli 1.

Analizy i badania prowadzone zarówno przez amerykańską agencję EPA, jak i europejskie stowarzyszenie CONCAWE, a także badania prowadzone od wielu lat przez autorów niniejszego artykułu wykazały, że gaz ziemny, w porównaniu z benzyną silnikową oraz olejem napędowym, ma znacznie większy potencjał redukcji gazów cieplarnianych. Przy porównaniu emisji gazów cieplarnianych z paliw

Table 1. Proposed default value of GHG (grams of CO₂ equivalent per MJ) for selected fuels [3]

Tabela 1. Proponowana wartość domyślna gazów cieplarnianych dla wybranych paliw [3]

Fuel/paliwo	CO ₂ emission index/wskaźnik emisji CO ₂ [gCO ₂ e/MJ]
Diesel/olej napędowy	97.05
Gasoline/benzyna	95.86
Ethanol/etanol	87.29
CNG	62.14
LNG	63.26
Biomethane/biometan	11.26
Electricity/elektryczność	11.00
Hydrogen from steam reformed NG/wodór otrzymywany w procesie reformingu parowego gazu ziemnego	95.51

of the emission of greenhouse gases and the use of 100% biomethane, depending on the technology of its obtainment, reduces the emission of greenhouse gasses by 97% (Fig. 1). Figure 1 presents the emission of CO₂ for hydrogen obtained with the method of steam reform (174 g/km) and electrolysis using renewable electrical energy (8 g/km). The emission values substantiate the trend of implementing systems based on low-carbon fuels. They are considered to be the fuel of the future as they provide a true chance of reduction of the emission of CO₂. When evaluating fuels in terms of their environmental impact, the level of emissions of toxic components generated by these fuels is also taken into account. The emission of these components is regulated by standards that, depending on the applied combustion system, force the carmakers to adapt it to the applicable legal regulations.

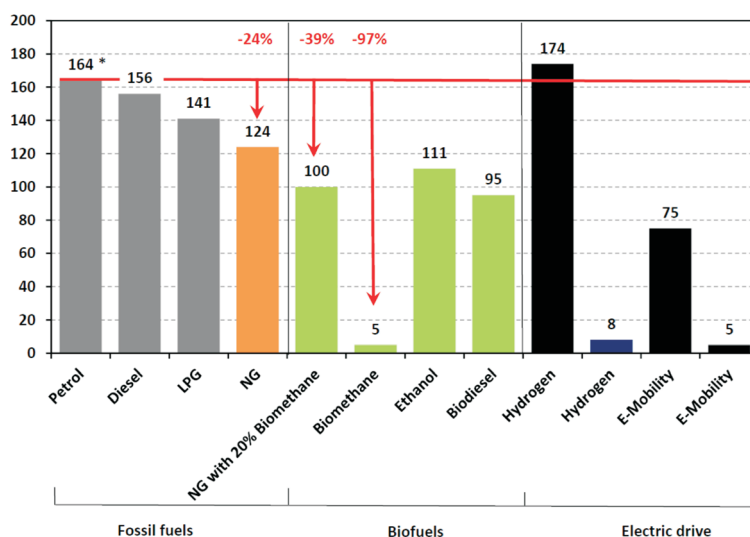
2. Natural gas as engine fuel

2.1. General characteristics

Natural Gas (NG) is currently one of the principal sources of energy in the world economy and as energy carrier has been used for many years as engine fuel. Natural gas is found in deep underground rock formations in the form of free gas (dry) or in the form of hydrocarbon hydrates (wet). The formation of natural gas is an effect of oxygenless decomposition of organic substances under high pressure. The period of formation of natural gas is estimated at several million years. Natural gas can be found as a separate resource is also found together with petroleum or coal.

Natural gas primarily consists of methane (CH₄) whose volumetric share usually exceeds 90%. The significance of natural gas is constantly growing. There are many factors that influence high priority of this energy carrier. Some of them were discovered long ago and, following rapid economic advancement and political changes, new aspects of use of

kopalnych do emisji przy wykorzystaniu gazu ziemnego okazuje się, że zmniejsza on emisję o 24%, w stosunku do emisji dla benzyny silnikowej, natomiast z LPG – jedynie o około 14%. Dodanie do gazu ziemnego 20% biometanu, czyli gazu odnawialnego zapewnia zmniejszenie emisji o 39%, a wykorzystanie 100% biometanu, w zależności od technologii jego pozyskania, zmniejsza emisję gazów cieplarnianych aż o 97% (rys. 1). Na rysunku 1 przedstawiono emisję CO₂ dla wodoru wytwarzanego technologią reformingu parowego (174 g/km) oraz otrzymywanego w procesie elektrolizy wykorzystującej odnawialną energię elektryczną (8 g/km). Podane wartości emisji uzasadniają tendencję do wdrażania systemów wykorzystujących do napędu tzw. paliwa nisko-węglowe. Są one rozpatrywane jako paliwa przyszłości, ponieważ dają realną szansę zmniejszenia globalnej emisji CO₂. Dokonując oceny danego paliwa pod względem jego oddziaływania na środowisko naturalne, uwzględniamy

Fig. 1. WTW (well-to-wheel) GHG emission in g CO₂ eq./km [5]Rys. 1. Wartości emisji gazów cieplarnianych [g CO₂ eq./km] w cyklu życia paliwa [5]

również poziom emisji związków toksycznych. Ich emisja jest regulowana normami, które w zależności od systemu spalania wymuszają na producentach nowych pojazdów ich dostosowanie do aktualnych wymagań prawnych.

2. Gaz ziemny jako paliwo silnikowe

2.1. Charakterystyka ogólna

Gaz ziemny (ang. *Natural Gas* – NG) jest obecnie jednym z podstawowych źródeł energii w gospodarce światowej, a jako nośnik energii jest również od wielu lat wykorzystywany jako paliwo silnikowe. Swoją nazwę zawdzięcza pochodzeniu, gdyż występuje w skorupie ziemskiej w postaci wolnego gazu (suchy), lub w formie hydratów węglowodorowych (mokry). Powstawanie gazu ziemnego jest efektem beztlenowego rozkładu substancji organicznych w wolnych przestrzeniach skorupy ziemskiej, często pod wysokim ciśnieniem. Okres tworzenia pokładów szacuje się na kilka milionów lat. Złoża gazu mogą występować samodzielnie,

this fuel have been discovered. Out of the already known advantages of natural gas as fuel, the most important are those related to the ecology. Because fuels must meet certain environmental standards, the level of emissions generated by the combustion of natural gas is of primary importance. Natural gas does not contain complex hydrocarbons or carcinogenic compounds. Natural gas does not generate solid combustion products (dust, soot etc.). The processes of excavation and distribution take place under conditions that are not particularly environmentally impactful. Another advantage of this fuel is the location of the resources that have not yet been extensively exploited.

The potential use of this fuel is practically dictated by the advancement of the technologies of its application. Natural gas is currently applied in the following branches of economy:

- energy production and heating,
- fuel in transport,
- industrial technologies,
- household use,
- HVAC systems,
- CHP aggregates,

It is noteworthy that the use of this energy carrier in the said branches is still growing. The stimuli of the growth are stringent emission requirements and economical aspects increasingly supported by incentive policies.

2.2. The application of natural gas in transport

The most popular form of natural gas used as fuel for combustion engines is compressed natural gas otherwise commonly referred to as CNG (Compressed Natural Gas). The fuel is stored in a tank under a pressure of 20–26 MPa, which provides a possibility of over 200-fold densification of energy stored in the vehicle. The energy value of 1 Nm³ of gas is approximately equal to 1 dm³ of gasoline or diesel fuel (Tab. 2).

Natural gas has been used in the automotive industry as fuel for a long time in both gasoline and diesel engines. A rapid development of this type of fueling began in 1980s of the last century and continues to date. Natural gas fueling systems have undergone a variety of design modifications and improvements: from simple mixer-based systems to

ale zwykle towarzyszą złożom ropy naftowej lub pokładom węgla kamiennego.

Podstawowym składnikiem gazu ziemnego jest metan (CH₄), którego objętościowy udział zazwyczaj przekracza 90%. Znaczenie gazu ziemnego w ostatnim okresie sukcesywnie wzrasta. Na wysoki priorytet wykorzystania tego nośnika energii składa się wiele czynników. Niektóre z nich zostały już wcześniej zauważone i są obecnie dobrze znane, lecz postępujący rozwój gospodarczy i przemiany polityczno-społeczne odkrywają ciągle nowe aspekty wykorzystania tego paliwa. Spośród poznanych zalet stosowania gazu ziemnego jako paliwa najbardziej znaczące dotyczą zagadnień ekologicznych. Ze względu na wymóg spełnienia odpowiednich norm, podstawowe znaczenie ma poziom emisji związków toksycznych w produktach spalania tego paliwa. Wynika to z faktu, że gaz ziemny nie zawiera złożonych węglowodorów, ani związków kancerogennych. Spaliny wolne są również od stałych odpadów spalania (pyły, sadze itp.). Procesy wydobywania i dystrybucji odbywają się w warunkach, które nie wywołują szczególnie negatywnego oddziaływania na środowisko. Innym atutem jest rozmieszczenie i wielkość zasobów naturalnych, które dotychczas nie były intensywnie eksploatowane.

Obszar możliwości potencjalnego wykorzystania paliwa jest w praktyce określany rozwojem technik jego zastosowań. Obecnie gaz ziemny znajduje szerokie zastosowanie w następujących sektorach gospodarki:

- energetyka i ciepłownictwo,
- napęd środków transportu,
- technologie przemysłowe,
- gospodarstwa domowe,
- systemy klimatyzacji i wentylacji,
- agregaty kogeneracyjne,

przy czym należy zauważyć, że jego wykorzystanie w wymienionych sektorach stale wzrasta. Stymulatorami tego wzrostu są, z jednej strony, rygory nakładanych norm emisyjnych, a z drugiej, względy ekonomiczne, coraz częściej popierane polityką promocyjną.

2.2. Zastosowania gazu ziemnego w transporcie

Podstawową formą wykorzystania gazu ziemnego jako paliwa w silnikach spalinowych jest instalacja zasilania sprężonym gazem ziemnym, powszechnie określana CNG (*Compressed Natural Gas*). Paliwo przechowywane jest w zbiorniku pod ciśnieniem 20–26 MPa, co daje możliwość ponad 200-krotnego zagęszczenia energii zmagazynowanej w pojeździe. Wartość energetyczna 1 Nm³ gazu jest w przybliżeniu równa 1 dm³ benzyny lub oleju napędowego (tab. 2).

Jako paliwo silnikowe gaz ziemny jest stosowany w motoryzacji od dawna i to zarówno w silnikach ZI, jak i ZS. Jednak intensywny rozwój systemów zasilania tym paliwem rozpoczął się w latach 80. XX wieku i trwa nadal. Stosowane instalacje zasilania przeszły w tym czasie wiele przeobrażeń konstrukcyjnych: od prostych systemów mieszalnikowych do współcześnie stosowanego, elektronicznie sterowanego wielopunktowego wtrysku zarówno do kolektora dolotowego, jak i bezpośrednio do komory spalania.

Tabela 2. Energia zawarta w wybranych paliwach

Table 2. Energy contained in selected fuels

Fuel/paliwo	Energy content/zawartość energii [kWh]
Natural gas/gaz ziemny 1 Nm ³	11
Biomethane/biometan 1 Nm ³	9.67
Gasoline/benzyna 1 dm ³	9.06
Diesel/olej napędowy 1 dm ³	9.8

sophisticated electronically controlled multipoint indirect and direct injection systems. Contemporary combustion systems have been presented in Fig. 2 – red color marks the main trends introduced by engine manufacturers. The design of high-pressure storage tanks has also undergone

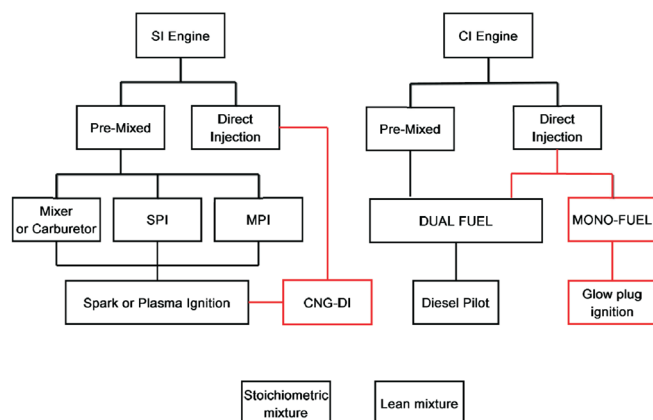


Fig. 2. Various NG combustion systems

Rys. 2. Systemy spalania gazu ziemnego

huge changes (Fig. 3 and 4). Today, two main solutions are applied: thick-walled cylinders or lightweight composite cylinders. It is noteworthy, however, that both available solutions constitute a downside in popularizing natural gas in the automotive industry: the first because of the large weight of the tank and the second, because of its high price resulting from the necessity to apply advanced technology of production.

An alternative way to store natural gas is the LNG system. The fuel is stored in a tank in a liquefied state. The phase change is a result of chilling of the gas to a temperature below -162°C . Such a solution results in a 630-fold reduction of the fuel volume. Maintaining such conditions however requires a special cryogenic tank. It is composed of an internal vessel and an external container that are connected in the flange section. In the space between their walls vacuum is maintained, which ensures proper thermal insulation (Fig. 5). Solutions of this type are increasingly applied not only in trucks and buses but marine transport as well.

An effective use of methane and hydrogen is limited by their low energy density that characterizes modern methods

Systemy spalania, które są stosowane we współczesnych silnikach przedstawiono na rys. 2 – kolorem czerwonym wyróżniono główny kierunek zmian wprowadzanych przez producentów silników gazowych. Diametralne zmiany zaszły również w konstrukcji zbiorników sprężonego gazu (rys. 3 i 4). Obecnie stosowane są dwa podstawowe rozwiązania: grubościennne butle stalowe lub lekkie zbiorniki kompozytowe. Trzeba jednak zaznaczyć, że obydwa dostępne rozwiązania są problematyczne w upowszechnianiu gazu ziemnego w motoryzacji: pierwsze – ze względu na znaczną masę własną zbiornika, a drugie – z powodu wysokiej ceny, wymuszonej koniecznością zastosowania zaawansowanej technologii produkcji.

Alternatywną formą, ze względu na sposób magazynowania paliwa, są instalacje LNG. Paliwo przechowywane jest w zbiorniku w stanie ciekłym. Przemiana fazowa następuje dzięki schłodzeniu gazu ziemnego do temperatury poniżej -162°C . Takie rozwiązanie powoduje 630-krotną redukcję objętości paliwa, lecz utrzymanie takich warunków wymaga zastosowania specjalnego zbiornika kriogenicznego. Jego konstrukcja składa się z naczynia wewnętrznego i zbiornika zewnętrznego, które łączą się w części kołnierzowej. W przestrzeni pomiędzy ich ściankami wytworzona jest próżnia, co zapewnia właściwą izolację cieplną (rys. 5). Tego typu rozwiązania stosowane są coraz powszechniej, przede wszystkim w samochodach ciężarowych i autobusach, lecz pojawiają się również instalacje LNG wykorzystywane w transporcie morskim.

Efektywne wykorzystanie zarówno metanu, jak i wodoru jest ograniczone małą gęstością energii charakteryzującą współczesne systemy magazynowania tych gazów w pojazdach. Z tego względu opracowywane są nowe technologie, w tym i te wykorzystujące adsorbenty sprzyjające obniżeniu masy i wymiarów zbiorników przeznaczonych do magazynowania gazu ziemnego sprężonego do ciśnienia 3,5 MPa. Taki sposób magazynowania określany jest angielskim skrótem – ANG i zapewnia zmagazynowanie, przy ciśnieniu 3,5 MPa, takiej ilości gazu, która odpowiada ilości gazu sprężonego



Fig. 3 Natural gas tanks in the past

Rys. 3. Historyczne zbiorniki na gaz ziemny


Fig. 4. Steel CNG tanks, $p_{\max} = 20 \text{ MPa}$

Rys. 4. Stalowe butle CNG, $p_{\max} = 20 \text{ MPa}$

of storage of these gases in vehicles. New technologies are being developed (including technologies based on adsorbents) leading to reduction of the weight and size of the pressure storage containers (3.5 MPa). This type of storage is referred to as ANG (adsorbed natural gas) and ensures accumulation of such an amount of gas at the pressure of 3.5 MPa that is equivalent to the amount of gas compressed to the pressure of 15–16 MPa. The storage system whose adsorbent is porous charcoal has been shown in Fig. 6.

2.3. The process of combustion of natural gas in an engine

The fact that natural gas has been applied as engine fuel for decades and the diversity of fueling system solutions allow a clear description of the characteristic features of the combustion of a mixture based on natural gas in a gasoline engine. The performed investigations and extensive experience are a complement in the interpretation of the processes occurring in engines fueled with natural gas. Because of the specificity of the application of natural gas fuel systems (usually fitted as alternative power systems), the obtained parameters and observed phenomena are usually compared to indexes and processes characteristic of gasoline as the base fuel. This presents the results obtained for natural gas in the form of pros and cons, characterizing the use of this fuel in direct relation to gasoline.

General conclusions formulated as a result of the comparison of these fuels indicate two problems that are accompanied by the combustion of natural gas in piston engines. One of them is a clear reduction of the index of usable parameters. When switching from gasoline to natural gas we may observe a reduction in the engine power by 8–12% on average, depending on the applied fueling system [2]. This change is attributed to low calorific value W_u of the



Fig. 6. Example storage system of natural gas in a vessel filled with an adsorbent

Rys. 6. Przykład budowy systemu magazynowania gazu ziemnego w naczyniu wypełnionym adsorbentem



Fig. 5. Cryogenic LNG tank fitted on a truck

Rys. 5. Kriogeniczny zbiornik LNG zamontowany na ciągniku siodłowym

do ciśnienia 15–16 MPa. System magazynowania, w którym adsorbentem jest porowaty węgiel przedstawiono na rys. 6.

2.3. Proces spalania gazu ziemnego w silniku

Wieloletnie stosowanie gazu ziemnego w grupie paliw silnikowych oraz różnorodność rozwiązań systemów zasilania tym paliwem pozwalają jednoznacznie opisać cechy charakteryzujące spalanie mieszanki palnej wytworzonej na bazie gazu ziemnego w silniku ZI. Przeprowadzone badania oraz bogate doświadczenia zdobyte podczas eksploatacji pojazdów uzupełniają się w interpretacji procesów zachodzących w silnikach zasilanych gazem ziemnym. Ze względu na obecną specyfikę wykorzystania instalacji gazowych do zasilania silników spalinowych, gdzie zwykle montowane są jako systemy alternatywne, uzyskane parametry i zaobserwowane zjawiska porównywane są na ogół ze wskaźnikami i procesami charakterystycznymi dla benzyny jako paliwa bazowego. Sprawia to, że wyniki uzyskiwane dla gazu ziemnego są klasyfikowane w postaci wad i zalet cechujących wykorzystanie tego paliwa w bezpośrednim odniesieniu do benzyny.

metry i zaobserwowane zjawiska porównywane są na ogół ze wskaźnikami i procesami charakterystycznymi dla benzyny jako paliwa bazowego. Sprawia to, że wyniki uzyskiwane dla gazu ziemnego są klasyfikowane w postaci wad i zalet cechujących wykorzystanie tego paliwa w bezpośrednim odniesieniu do benzyny.

Ogólne wnioski formułowane w wyniku porównania tych paliw wyraźnie sygnalizują dwa problemy, które towarzyszą spalaniu gazu ziemnego w silnikach tłokowych. Pierwszy z nich to wyraźne obniżenie wartości wskaźników użytkowych. Przy zmianie paliwa z benzyny na gaz ziemny obserwowany jest spadek mocy silnika średnio o 8–12%, w zależności od zastosowanego układu zasilania [2]. Zmiana ta jest wywołana przede wszystkim niską wartością opałową W_u wytworzonej mieszanki powietrzno-gazowej. Inną przyczyną jest wysoka wartość L_a , co powoduje, że zmniejsza się ilość paliwa w danej objętości wypełnionej mieszanką. Przy wykorzystaniu alternatywnych instalacji dodatkowo odnotowywany jest również spadek wskaźnika napełnienia η_v silnika. W konsekwencji tych zmian, w tych samych

formed gas-air mixture. Another reason is the high value of L_a , which reduces the amount of fuel in a given volume of the mixture. When using alternative fuel systems also a decrease in the cylinder filling coefficient η_v is observed. As a consequence, under the same conditions of engine load, the portion of charge fed to the cylinder in each cycle contains less energy, which has an adverse effect on the pressure value p_i and other indexes calculated on its basis.

A direct comparison shows a decrease in the stoichiometric mixture W_u for natural gas (2.7 MJ/kg) compared to gasoline (2.9 MJ/kg) by approx. 7%. Taking the fuel and air densities under normal conditions into account, we may compare these quantities volumetrically. The calorific value of a stoichiometric mixture for gasoline is 3.7 MJ/m³ and is by 7.8% higher than for natural gas, for which $W_u = 3.43$ MJ/m³.

Another reason of a reduction of power is a difference in the course of the combustion process. It is commonly known that combustion of natural gas in an engine is a prolonged process. It is confirmed by the results of laboratory investigations (Fig. 7) [3]. On the presented example (fueling with natural gas) the greatest differences are observed in the time of initiation of combustion. Despite the fact that the consequent process of heat release is equally intense as in gasoline, the effect of prolonged combustion in the initial phase of the process is a lower rate of pressure increment. The value of the maximum pressure is also lower as the main phase of the process of combustion falls in the period when the piston movement leads to an increase in the volume of the combustion chamber and gradual charge decompression takes place.

A shift of the combustion process in a work cycle triggers changes in the charge temperature. In terms of energy balance, it is best when the exhaust gas temperature leaving the combustion chamber is as low as possible. In this case, however, we observe an opposite trend (Fig. 8) because the shift of the combustion process reduces the period when the charge temperature decreases due to decompression and heat release to the walls of the combustion chamber. The consequence of these changes is a higher temperature

warunkach regulacji i obciążenia silnika, porcja ładunku dostarczana w każdym cyklu do komory spalania zawiera mniej energii, co wpływa niekorzystnie na wartość ciśnienia p_i i dalsze wskaźniki obliczane na tej podstawie.

Bezpośrednie porównanie wykazuje spadek W_u mieszanki stechiometrycznej dla gazu ziemnego (2,7 MJ/kg) w odniesieniu do benzyny (2,9 MJ/kg) na poziomie ok. 7%. Uwzględniając gęstości paliw i powietrza w warunkach normalnych, można porównać te wielkości objętościowo. Wartość opałowa mieszanki stechiometrycznej dla benzyny wynosi 3,7 MJ/m³ i jest wyższa o 7,8% niż dla gazu ziemnego, gdzie $W_u = 3,43$ MJ/m³.

Następną przyczyną zmniejszenia mocy są różnice w przebiegu procesu spalania. Znana jest powszechnie opinia, że spalanie gazu ziemnego w silniku ma charakter przewlekły. Znajduje ona swoje uzasadnienie również w wynikach badań stanowiskowych (rys. 7) [3].

Na przedstawionym przykładzie można zaobserwować, że przy zasilaniu gazem ziemnym największe różnice obserwuje się w okresie inicjacji procesu spalania. Mimo że dalszy przebieg wywiązywania ciepła jest równie intensywny jak przy stosowaniu benzyny, to jednak efektem przewlekłego spalania w początkowej fazie procesu jest mniejsza szybkość narastania ciśnienia. Mniejsza jest również wartość ciśnienia maksymalnego, ponieważ zasadnicza faza procesu spalania przypada w tym układzie na okres, kiedy ruch tłoka powoduje zwiększanie objętości komory spalania i następuje stopniowe rozprężanie ładunku.

Przesunięcie procesu spalania w cyklu roboczym wywołuje równocześnie zmiany temperatury ładunku. Z punktu widzenia bilansu energii korzystne jest, aby temperatura spalin opuszczających komorę spalania była jak najniższa. W tym przypadku natomiast obserwujemy tendencję odwrotną (rys. 8), ponieważ przesunięcie procesu spalania skraca okres, w którym temperatura ładunku obniża się z powodu rozprężania ładunku i przepływu ciepła do ścian otaczających komorę spalania. Konsekwencją tych zmian jest wyższa temperatura ładunku w końcowej części suwu pracy. Ma to niekorzystny wpływ na skład emitowanych spalin, ponieważ jest on ściśle uzależniony od tempera-

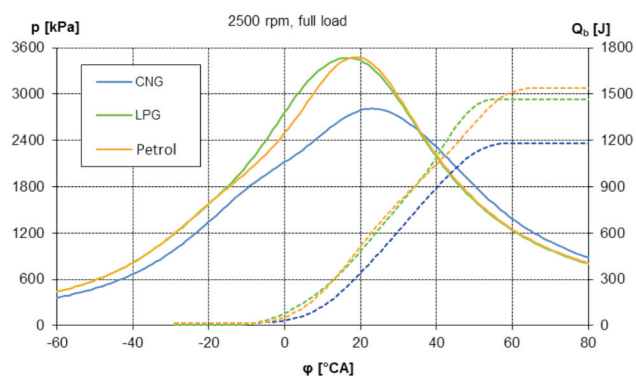


Fig. 7. Changes in the indicated pressure and heat release for different fuels

Rys. 7. Zmiany ciśnienia indykowanego i wydzielania ciepła dla różnych paliw

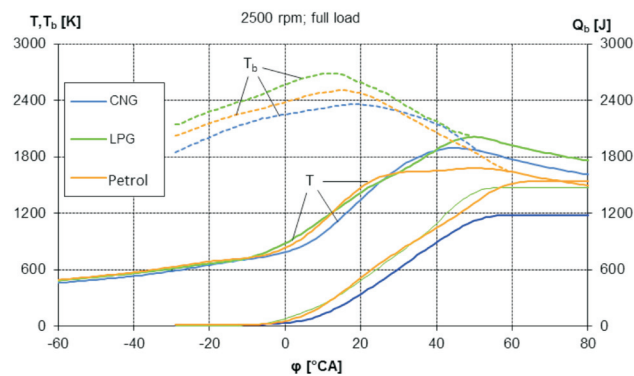


Fig. 8. Comparison of the charge temperature, the temperature in the exhaust zone and heat release for gasoline, LPG and CNG

Rys. 8. Porównanie temperatury ładunku, temperatury w strefie spalin i wydzielania ciepła dla benzyny, LPG i CNG

of the charge in the final part of the power stroke. This has an adverse effect on the composition of the generated exhaust gas because this composition is tightly related to the temperature. The consequence is, for example, an increased emission of NO_x [1].

The adverse effects illustrated by the above example constitute some sort of a challenge – one needs to seek a solution in such an orchestration of the energy conversion process in the engine to improve its overall efficiency while still taking advantage of the environment friendly fuels of low carbon content.

3. Enriching methane with hydrogen

An ideal fuel in the ecological aspect is hydrogen, because the products of its combustion do not contain carbon compounds and hydrocarbons. It can be used in a compressed – H_2 , or liquefied – LH_2 form. Its wide use is not yet economically justified. In practice, there are several problems of technical and technological nature that prevent efficient use of this energy carrier [5]. Hydrogen is an explosive gas and its storage and distribution requires application of special alloys for the construction of the installation components. Due to low molecular mass (small particles) hydrogen is a highly penetrating gas, which is why hydrogen systems require special sealing technologies.

A feasible solution is, however, the application of combustible blends of hydrogen and natural gas, because such blends form fuels of even lower carbon content than conventional crude oil fuels. An increase in the share of hydrogen in the mixture with natural gas (up to 50% of the volume) does not increase the risk of explosion and does not force the application of special materials of the infrastructure. Applications of such type of fuel are found in spark ignition engines. A gaseous fuel referred to as HCNG, is a mixture of CNG with an 4-9% addition of hydrogen. In some countries, special routes exist, along which HCNG fueling stations are available [6]. North America has introduced their own system known as HYTHAN® (HYdrogen+meTHANe) designed for diesel engines. The system is based on two fuels – Hythan + diesel oil. The volumetric share of hydrogen in the fuel changes up to 20%, while the average energy share amounts to 5–7%. Such a type of fueling reduces the consumption of diesel oil in the range 50–70% and the emission of NO_x up to 60% [7].

The presented examples show new possibilities in the area of alternative fuels. A significant practical advantage of these fuels is the possibility of applying the existing CNG fueling systems (no need to develop a new system). An important argument that stimulates the development of the described fuels is the economic benefits resulting from their lower price.

tury. Skutkiem tego jest np. podwyższona zawartość NO_x w spalinach [1].

Niekorzystne zjawiska zilustrowane na powyższym przykładzie stanowią pewnego rodzaju wyzwanie – należy szukać rozwiązań w takiej organizacji procesu przetwarzania energii w silniku, aby możliwe było podniesienie jego sprawności ogólnej, przy jednoczesnym wykorzystaniu atutów, jakie mają ekologiczne paliwa o obniżonej zawartości węgla.

3. Wzbogacanie metanu wodorem

Idealnym paliwem w ujęciu ekologicznym jest wodór, ponieważ produkty jego spalania nie zawierają związków węgla oraz węglowodorów. Może być on wykorzystywany w postaci sprężonej – H_2 , lub skroplonej – LH_2 . Jednak jego powszechne zastosowanie nie jest jeszcze opłacalne. W praktyce istnieje obecnie wiele problemów technicznych i technologicznych uniemożliwiających efektywne wykorzystanie tego nośnika energii [5]. Wodór jest gazem wybuchowym, a jego magazynowanie i dystrybucja wymagają zastosowania specjalnych stopów metali jako materiałów konstrukcyjnych elementów instalacji. Ze względu na małą masę cząsteczkową (mały rozmiar cząsteczek) jest gazem silnie penetrującym, dlatego armatura stosowana w instalacjach wodorowych wymaga specjalnej technologii wykonania uszczelnień.

Realnym rozwiązaniem staje się jednak zastosowanie mieszanin paliwowych wodoru z gazem ziemnym, ponieważ taka mieszanina daje możliwość uzyskania paliwa o jeszcze mniejszej zawartości węgla w stosunku do konwencjonalnych paliw ropopochodnych. Ponadto zwiększenie udziału wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym, nawet do 50% objętości, nie zwiększa zagrożenia wybuchem i nie wprowadza konieczności stosowania specjalnych materiałów w konstrukcji elementów infrastruktury. Istnieją aplikacje, które wykorzystują taki rodzaj paliwa w silnikach ZI. Paliwo gazowe, określane w skrócie HCNG, jest mieszaniną sprężonego gazu ziemnego z dodatkiem wodoru rzędu 4–9%. W niektórych krajach tworzone są specjalne trasy, wzdłuż których usytuowane są stacje tankowania HCNG

Table 3. Physicochemical properties of fuels
Tabela 3. Właściwości fizykochemiczne wybranych paliw

	Hydrogen/ wodór H_2	Methane/ metan CH_4	Gasoline/ benzyna
Flammability of gas in air /zakres palności [% obj. gazu w powietrzu]	4–75	5.3–15.0	1.2–6.0
Minimum ignition energy/min. energia zapłonu [mJ]	~0.02	~0.28	~0.25
Flame velocity/prędkość płomienia [m/s]	~2.90	~0.38	~0.37–0.43
Adiabatic flame temperature/adiabatyczna temp. płomienia [K]	~2318	~2190	~2470
Autoignition temperature/temp. samozapłonu [K]	~858	~813	~500–750
Density/gęstość [kg/m^3]; 293.15 K i 101.3 kPa	0.082	0.717	720–760
Stoichiometric ratio/stosunek stechiometryczny [$\text{kg pow.}/\text{kg pal.}$]	~34	17.5	14.9
Fuel calorific value/wartość opałowa paliwa [MJ/kg]	~120	~50	~46
Calorific value of the stoichiometric mixture/wartość opałowa mieszanki stechiometrycznej [MJ/Nm^3]	2.96	3.43	3.7

From the analysis of the published results of investigations on low carbon gaseous fuels of increased hydrogen content results a conclusion that the properties of these fuels allow a more efficient combustion of the charge while environmentally acceptable combustion products are ensured. Research in the area of CH_4/H_2 mixtures discovers new levels of application. The resulting conclusions indicate the main benefits:

- reduction of the combustion time owing to increased combustion rate; both in the period of initiation of combustion (MFB = 0–10%) and during effective combustion (MFB = 10–90%),
- significant reduction of the emission of CO_2 and CO,
- increased overall efficiency – mixture volumetric share H_2 = 10–30%.

4. Research object and results

4.1. The test stand

The test stand was designed in such a way that the tested engine, together with the vehicle, were positioned on a chassis dynamometer (Fig. 9). The tested engine (marked X16SZR) was a traditional 4-cylinder straight engine fitted in Opel Astra. The vehicle selected for the test represents a compact category of vehicles. The solutions applied in this vehicle such as the design and engine equipment (fueling system, ignition system etc.) are commonly applied in the automotive market and are within a standard of this class of vehicles. This substantiates the assumption as to the universality of the conclusions and trends resulting from the investigations. This also allows transposing these conclusions and trends on other engines of the same class.

The measurement equipment on the tests stand measured the basic engine and ambient parameters in the entire range of engine speeds and loads. The measurements of the basic usable parameters were performed at the chassis dynamometer and its equipment. The test engine was also fitted with

[6]. W Stanach Zjednoczonych znany jest również system o nazwie HYTHAN® (HYdrogen+meTHAN), który jest przeznaczony do silników ZS. System ten zakłada zasilanie dwupaliwowe Hythan + ON. Objętościowy udział wodoru w paliwie zmienia się aż do 20%, natomiast średni udział energetyczny wynosi 5–7%. Taki rodzaj zasilania pozwala na zmniejszenie zużycia ON w zakresie 50–70%, a także ogranicza emisję NO_x nawet do 60% [7].

Przytoczone przykłady wskazują nowe możliwości w zakresie stosowania paliw alternatywnych. Znacznym atutem praktycznym jest możliwość wykorzystania istniejących instalacji zasilania CNG, gdyż eliminuje to konieczność wytworzenia nowego, odrębnego systemu zasilania. Istotnym argumentem stymulującym rozwój opisywanego zasilania jest możliwość uzyskania korzyści ekonomicznych, wynikających z niższej ceny paliwa.

Z analizy opublikowanych wyników przeprowadzonych badań, w zakresie zastosowania niskowęgłowych paliw gazowych o podwyższonym udziale wodoru, wynika stwierdzenie, że dzięki jego właściwościom możliwe jest bardziej efektywne spalanie ładunku w silniku, przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniej jakości produktów spalania. Postępujące badania, głównie w zakresie mieszanin CH_4/H_2 odkrywają nowe płaszczyzny ich zastosowania. Wnioski płynące z tych opracowań wskazują główne korzyści:

- skrócenie czasu spalania dzięki zwiększonej prędkości spalania; zarówno w okresie inicjacji (MFB = 0–10%), jak i w okresie spalania efektywnego (MFB = 10–90%),
- znaczną redukcję emisji CO_2 i CO,
- zwiększenie sprawności ogólnej silnika – mieszaniny o udziale objętościowym H_2 = 10–30%.

4. Obiekt i wyniki badań

4.1. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze zorganizowano w ten sposób, że badany silnik wraz z pojazdem umieszczono na hamowni podwoziowej (rys. 9). Badany silnik o oznaczeniu X16SZR jest klasycznym 4-cylindrowym silnikiem rzędowym, seryjnie zamontowanym w samochodzie osobowym Opel Astra. Pojazd wybrany do badań jest przedstawicielem tzw. klasy kompakt. Zastosowane w nim rozwiązania techniczne, obejmujące również konstrukcję i wyposażenie silnika (np. układ zasilania, układ zapłonowy itp), znajdują wiele odpowiedników na rynku motoryzacyjnym i mieszczą się w standardach dla tej klasy pojazdów. Daje to podstawę do przyjęcia założenia o uniwersalności zasadniczych wniosków i tendencji wyznaczonych podczas badań. Pozwala też na przeniesienie ich na inne silniki

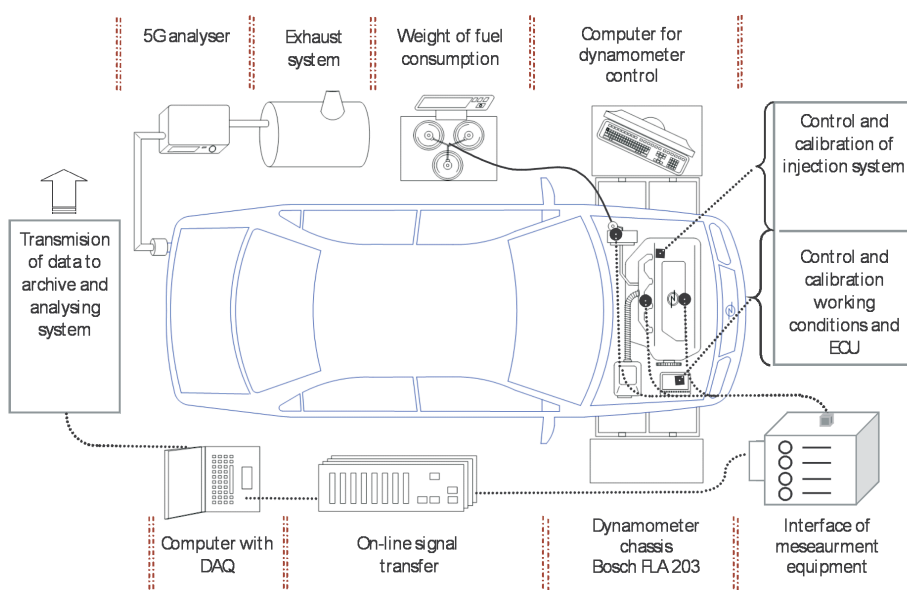


Fig. 9. Schematic diagram of the test stand

Rys. 9. Schemat poglądowy stanowiska pomiarowego

a system measuring the indicated pressure in one of the cylinders together with a marker allowing a synchronization of the pressure signal with the crankshaft position. The data transmission and recording systems on the test stand were also fully automated.

4.2. Analysis of the tests results

Fuels in the form of compressed mixture of gases of different volumetric proportions were prepared for the tests. The scope of the investigations included 8 blends of variable composition from pure CH_4 to a 50/50 blend of $\text{CH}_4 + \text{H}_2$. The measurement of $N_s(n)$ and $M_o(n)$ carried out on the chassis dynamometer allowed an evaluation of the changes of the engine usable parameters by the change in the fuel blend composition (Tab. 4).

The measurement of the power at wheels N_k has confirmed the trend of the observed changes. The measurement was performed at engine maximum load and steady engine speed (Fig. 10). The analysis of η_o indicates a clear increase in the overall efficiency as the engine speed grows (Fig. 11).

Table 4. Points of maximum values of N_s and M_o from the engine characteristics

Tabela 4. Zestawienie punktów maksymalnych wartości N_s i M_o z charakterystyki zewnętrznej silnika

$N_{\max}$ [kW]	at n [rpm]/ przy n [obr/min]	fuel/paliwo	$M_{\max}$ [N·m]	at n [rpm]/ przy n [obr/min]
50.9	5030	100% CH_4	115.2	2710
50.6	5260	95% CH_4 , 5% H_2	113.1	2680
51.7	5300	90% CH_4 , 10% H_2	117.0	2730
52.2	5250	85% CH_4 , 15% H_2	122.5	2790
53.0	5250	80% CH_4 , 20% H_2	118.6	2880
52.6	5300	70% CH_4 , 30% H_2	117.9	2650
51.7	5300	60% CH_4 , 40% H_2	117.7	2620
51.1	5300	50% CH_4 , 50% H_2	116.3	2570

The composition of the exhaust gas is tightly related to the composition of the fuel. The most conspicuous is the reduction of the emission of CO_2 , which is a result of a reduced share of carbon in the charge prepared for combustion (Fig. 12). With the combustion process properly realized

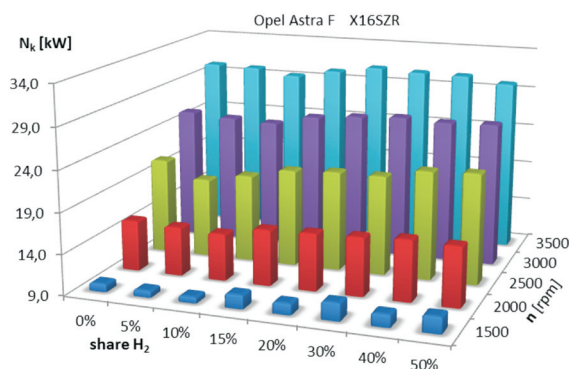


Fig. 10. Changes in the power measured at wheels when the engine was fueled with methane-hydrogen fuel; load 100%; $\lambda = 1.0$

Rys. 10. Zmiany mocy mierzonej na kołach pojazdu przy zasilaniu silnika mieszaninami metanowo-wodorowymi; obciążenie 100%; $\lambda = 1,0$

o podobnej konstrukcji montowane w tej klasie pojazdów.

Aparatura pomiarowa na stanowisku badawczym daje możliwość pomiaru podstawowych parametrów pracy silnika i warunków otoczenia w pełnym zakresie prędkości obrotowej i obciążenia silnika. Pomiary podstawowych parametrów użytkowych silnika zapewnia hamownia podwoziowa wraz z wyposażeniem. Na silniku pojazdu przeznaczonego do badań funkcjonuje również system pomiarowy zmian ciśnienia indykowanego w jednym z cylindrów, wraz ze znacznikiem umożliwiającym synchronizację sygnału ciśnienia z pozycją układu korbowo-tłokowego. W pełni zautomatyzowano również system rejestracji i transmisji danych pomiarowych na stanowisku.

4.2. Analiza wyników przeprowadzonych badań

W realizowanym programie badań przygotowano paliwa w postaci sprężonej mieszaniny gazów o różnych proporcjach objętościowych. Zakres badań obejmował 8 mieszanin o zmiennym składzie od czystego CH_4 do mieszaniny $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ w proporcji 50/50. Pomiary $N_s(n)$ i $M_o(n)$ przeprowadzone na hamowni podwoziowej pozwalają na ocenę zmian wartości parametrów użytkowych silnika wywołanych zmianą składu mieszaniny paliwowej (tab. 4).

Pomiary mocy na kołach pojazdu N_k potwierdziły tendencje zaobserwowanych zmian. Pomiarów

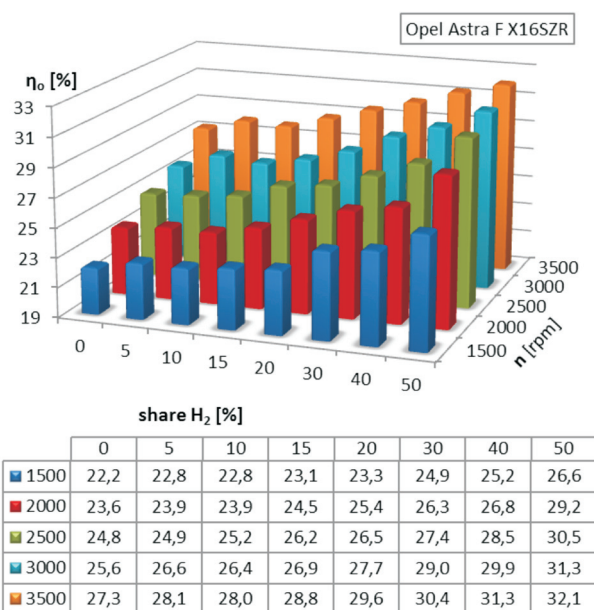


Fig. 11. Results of calculations of η_o within the scope of the investigations; load 100%; $\lambda = 1.0$

Rys. 11. Zestawienie wyników obliczeń η_o w realizowanym zakresie badań; obciążenie 100%; $\lambda = 1,0$

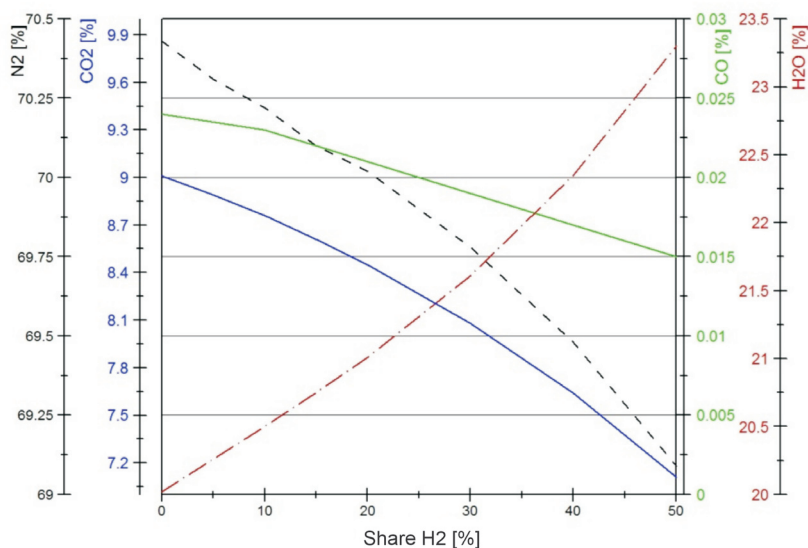


Fig. 12. Changes in the concentrations of main exhaust components depending on the share of the addition of H_2 to CH_4 (combustion, of stoichiometric mixtures)

Rys. 12. Zmiany stężeń głównych składników spalin w zależności od wielkości dodatku H_2 do CH_4 przy spalaniu mieszanek stechiometrycznych

(temperature, ignition conditions, mixture composition etc.) we may also expect a lower value of CO. An increase in the share of H_2O in the exhaust is an effect of an increased share of hydrogen in the fuel.

5. Conclusions

The problems discussed in this paper are aimed at promoting a practical use of methane-hydrogen blends as fuels for spark ignition engines fitted with CNG fueling systems. The fundamental motivator is a reduced emission of CO_2 . Fuels of this type are characterized by an increased share of hydrogen energy compared to the energy generated by the oxidation of carbon. The application of CH_4/H_2 or HCNG blends is also one of the stages leading to the advancement of systems based on pure hydrogen as fuel.

The results of the conducted experimental and simulation research have shown that the low-carbon fuels selected for the tests can be used as full-value regular fuels in spark ignition engines. When assessing the engine power on gaseous fueling, the authors have observed that obtaining such a power output as for the base fuel (gasoline) is impossible. This is a natural phenomenon from the point of view of the energy balance. The energy conversion efficiency may still be improved if optimum conditions of combustion control are ensured, which can be confirmed by the obtained values of η_o . It should be stressed that the level of power (despite a slight drop by approx. 10%) does not degrade this group of fuels at all.

The majority of modern engines burning gaseous fuels are originally designed and optimized to burn liquid fuels, which is why in the next stage of the research a detailed optimization of the parameters (decisive of the charge preparation and mixture combustion) must be performed. Separate issues are still: further advancement of the gaseous

dokonano przy maksymalnym obciążeniu silnika i ustalonych prędkościach obrotowych (rys. 10). Analiza obliczonej η_o wskazuje wyraźny wzrost sprawności ogólnej, wraz ze wzrostem prędkości obrotowej silnika (rys. 11).

Zasadniczy skład emitowanych spalin ściśle zależy od składu wykorzystywanego paliwa. Najistotniejszą zmianą jest w tym zestawieniu znaczne zmniejszenie emisji CO_2 , co jest wynikiem obniżonego udziału węgla w ładunku przygotowanym do spalania (rys. 12). Przy prawidłowo realizowanym procesie spalania (odpowiednia temperatura, warunki zapłonu, skład mieszanki itp.) można również spodziewać się mniejszej zawartości CO. Wzrost udziału H_2O w spalinach jest efektem zwiększonego udziału wodoru w paliwie.

5. Podsumowanie

Zagadnienia podjęte w ramach niniejszego artykułu są ukierunkowane na promowanie praktycznego wykorzystania mieszanin metanowo-wodorowych do napędu silników ZI, przy użyciu istniejących instalacji zasilania gazem ziemnym. Podstawowym argumentem motywacyjnym jest zmniejszona emisja CO_2 . Paliwa tego rodzaju cechują się zwiększonym udziałem tzw. energii wodorowej w stosunku do energii pochodzącej z utleniania węgla. Zastosowanie mieszanin CH_4/H_2 lub HCNG jest poza tym etapem prowadzącym do rozwoju systemów wykorzystujących czysty wodór jako paliwo.

Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych i symulacyjnych wykazały, że wybrane do badań paliwa niskowęglowe mogą być użytkowane jako pełnowartościowe paliwa w silniku ZI. Oceniając moc rozwijaną przez silnik, można stwierdzić, że nie ma możliwości uzyskania takich jej wartości, jak przy zasilaniu paliwem bazowym – benzyną. Jest to naturalne zjawisko z punktu widzenia bilansu energetycznego. Jednak efektywność procesu konwersji energii w silniku może ulec poprawie, przy zapewnieniu optymalnych warunków sterowania procesem spalania, o czym świadczą uzyskane wartości η_o . Należy przy tym podkreślić, że poziom rozwijanej mocy, mimo niewielkiego spadku (ok. 10%), w żaden sposób nie dyskredytuje tej grupy paliw.

Uwarunkowania techniczne większości współczesnych silników spalinowych, w których spalane są paliwa gazowe, są przystosowane i zoptymalizowane pod kątem konwencjonalnych paliw ciekłych, dlatego w następnym etapie badań należy dokonać szczegółowej optymalizacji nastaw parametrów regulacyjnych, decydujących o przebiegu procesów przygotowania i spalania ładunku w silniku. Ponadto odrębnymi zagadnieniami pozostają: dalszy rozwój systemów magazynowania tych paliw w pojeździe oraz budowa odpowiedniej sieci stacji tankowania paliw niskowęglowych.

fuel storage and development of a network of low-carbon fuel filling stations.

Symbols and abbreviations

ANG	Adsorbed natural gas/ <i>adsorpcja gazu ziemnego</i>
CNG	compressed natural gas/ <i>sprężony gaz ziemny</i>
GHG	greenhouse gas/ <i>gaz cieplarniany</i>
LCA	life cycle assessment/ <i>ocena cyklu życia (paliwa)</i>
LNG	liquefied natural gas / <i>skroplony gaz ziemny</i>
LPG	liquefied petroleum gas/ <i>skroplona mieszanina propanu i butanu</i>
ON	diesel fuel/ <i>olej napędowy</i>

Nomenclature

L_a [kg pow./kg pal.]	theoretical demand/ <i>teoretyczne zapotrzebowanie powietrza</i>
MFB [-]	mass fraction burned/ <i>współczynnik wypalenia ładunku</i>
M_o [N·m]	torque/moment obrotowy silnika
n [obr/min]/[rpm]	engine speed/ <i>prędkość obrotowa</i>
N_s [kW]	engine effective power/ <i>moc użyteczna silnika</i>
N_k [kW]	engine power at wheels/ <i>moc zmierzona na kołach pojazdu</i>
P [kPa]	cylinder pressure/ <i>ciśnienie panujące w cylindrze</i>
p_i [kPa]	mean indicated pressure/ <i>średnie ciśnienie indykowane</i>
Q_b [J]	energy released in the combustion process/ <i>energia wyzwolona w procesie spalania</i>

T [K]	charge temperature in the combustion chamber/ <i>temperatura ładunku w komorze spalania</i>
T_b [K]	temperature in the exhaust zone/ <i>temperatura w strefie spalin</i>
W_u [MJ/kg]	calorific value of the combustible mixture/ <i>wartość opałowa mieszanki paliwowo-powietrznej</i>
η_o [%]	overall efficiency/ <i>sprawność ogólna (efektywna) silnika</i>
η_v [%]	volumetric cylinder filling coefficient/ <i>objętościowy wskaźnik napełnienia cylindra</i>
ϕ [°OWK]/[C.A.]	crankshaft angle/ <i>kąt obrotu wału korbowego</i>

Bibliography/Literatura

- [1] Bechtold R. Alternative Fuels Guidebook. SAE International, 1997, ISBN 0-7680-0052-1.
- [2] Norbeck J., Heffel J., Durbin T., Tabbara B., Bowden J., Montano M. Hydrogen Fuel for Surface Transportation; 1996 Society of Automotive Engineers, Inc. ISBN 1-56091-684-2.
- [3] RTFO Guidance Part Two: Carbon and Sustainability Guidance, Version 7.0 April 2014; UK Department for Transport, April 2014.
- [4] Ahman M. Biomethane in the transport sector – An appraisal of the forgotten option; Energy Policy (2009), doi:10.1016/j.enpol.2009.09.007
- [5] Flekiewicz M., Kubica G., Flekiewicz B. An attempt of exhaust gases composition prediction in SI engines powered by gasoline and gaseous fuels. Journal of Kones 2009, vol.16 no.4, Warszawa 2009.
- [6] Flekiewicz M., Kubica G., Flekiewicz B. Hydrogen enriched CNG – a tool for dual fuel engine overall performance improvement. Warrendale. SAE Technical Paper ; nr 2009-01-2681, SAE 2009.
- [7] Kubica G. Badanie procesu spalania w silniku samochodu Opel Astra I 1.6 zasilanym sprężonym gazem ziemnym, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, z.61, Gliwice 2007.
- [8] Venetsanos A.G., Teodorczyk et al. An Inter-comparison exercise on the capabilities of CFD models to predict the short and long term distribution and mixing of hydrogen in a garage, International Journal of Hydrogen Energy 34(2009) 5912-5923.

Marek Flekiewicz, DEng. – doctor in the Faculty of Transport at Silesian University of Technology.
Dr inż. Marek Flekiewicz – adiunkt na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej.
e-mail: marek.flekiewicz@polsl.pl



Grzegorz Kubica, DSc., DEng. – doctor in the Faculty of Transport at Silesian University of Technology.
Dr hab. inż. Grzegorz Kubica – adiunkt na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej.
e-mail: grzegorz.kubica@polsl.pl

