

Article citation info:

Biedrzycki J, Bukrejewski P, Chłopek Z, Skolniak M, Wójcik P, Wysoczarski D. Examining the physicochemical and operational properties of the LPG fuel with an addition of light aliphatic hydrocarbons. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2016; 71(1): 19-35, <http://dx.doi.org/10.14669/AM.VOL71.ART2>

# Badania właściwości fizykochemicznych i eksploatacyjnych paliwa LPG z dodatkiem lekkich węglowodorów alifatycznych

JACEK BIEDRZYCKI<sup>1</sup>, PAWEŁ BUKREJEWSKI<sup>2</sup>,  
ZDZISŁAW CHŁOPEK<sup>3</sup>, MARTA SKOLNIAK<sup>4</sup>, PIOTR WÓJCIK<sup>5</sup>,  
DARIUSZ WYSOCZARSKI<sup>6</sup>

Przemysłowy Instytut Motoryzacji  
Politechnika Warszawska

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań porównawczych paliwa LPG (ang. *Liquefied Petroleum Gas* – skroplony gaz ropopochodny) oraz paliwa LPG z dwoma rodzajami dodatków lekkich węglowodorów alifatycznych, przede wszystkim metanu. Badania wykonywano ze względu na właściwości fizykochemiczne paliw zgodnie z normą PN-EN 589 oraz ze względu na właściwości użytkowe samochodu zasilanego badanymi paliwami. Podstawowym celem badań była ocena, w jakim stopniu jest dopuszczalny udział lekkich węglowodorów alifatycznych, przede wszystkim metanu, w paliwie LPG, którego podstawowymi składnikami są alkanany lub alkeny C3 i C4. Dodatek lekkich węglowodorów alifatycznych do LPG może mieć istotne znaczenia dla właściwości paliwa przede wszystkim z powodu dużej prężności ich pary nasyconej. Skład paliw wyznaczono metodą chromatografii

<sup>1</sup> Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 01-301 Warszawa, Polska; e-mail: j.biedrzycki@pimot.eu

<sup>2</sup> Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 01-301 Warszawa, Polska; e-mail: p.bukrejewski@pimot.eu

<sup>3</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-791 Warszawa, Polska, e-mail: zchlopek@simr.pw.edu.pl

<sup>4</sup> Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 01-301 Warszawa, Polska; e-mail: m.skolniak@pimot.eu

<sup>5</sup> Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 01-301 Warszawa, Polska; e-mail: p.wojcik@pimot.eu

<sup>6</sup> Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 01-301 Warszawa, Polska; e-mail: d.wysoczarski@pimot.eu

gazowej. Dodatek metanu w paliwach badawczych wynosił 0,1% m/m<sup>7</sup> i 0,2% m/m, a etanu 0,2% m/m. Paliwa spełniały wymagania normy PN-EN 589. Właściwości eksploatacyjne samochodu badano na hamowni podwoziowej. Nie stwierdzono niekorzystnych właściwości dodatku lekkich węglowodorów alifatycznych do paliwa LPG ze względu na moc użyteczną silnika oraz ze względu na emisję zanieczyszczeń.

**Słowa kluczowe:** silniki spalinowe, LPG, lekkie węglowodory alifatyczne

## 1. Wstęp

Paliwami niekonwencjonalnymi do silników spalinowych określa się te, do których bezpośrednio producenci nie przystosowują powszechnie wytwarzanych przez siebie silników spalinowych oraz – ze względu na instalacje paliwowe – również pojazdów. Są to – w związku z tym – paliwa niekonwencjonalne w stosunku do benzyn silnikowych dla silników o zapłonie iskrowym i olejów napędowych dla silników o zapłonie samoczynnym. Spośród paliw niekonwencjonalnych szczególnie są rozpowszechnione paliwa gazowe skomponowane na bazie ropopochodnych gazów, zwane LPG (ang. *Liquefied Petroleum Gas* – skroplony gaz ropopochodny), przechowywane w fazie skroplonej pod ciśnieniem około (0,3 – 0,5) MPa [1, 2, 5, 10, 17]. Głównymi składnikami tego paliwa są propan i butan [1, 2, 5, 10, 17]. W literaturze anglojęzycznej dla paliwa LPG jest stosowany termin „*autogas*” [1, 2, 4, 16]; w związku z tym w Polsce spotyka się spolszczoną wersję tej nazwy, mianowicie „*autogaz*” lub „*auto-gaz*”. O dużej popularności paliwa LPG decyduje przede wszystkim jego niska cena w stosunku do benzyn silnikowych i olejów napędowych.

Istnieje możliwość stosowania LPG do silników o zapłonie zarówno iskrowym, jak i samoczynnym. Silniki o zapłonie iskrowym na LPG występują przede wszystkim jako silniki dwupaliwowe z podstawowym oryginalnym układem zasilania na benzynę. W takim wypadku rozruch i nagrzewanie się silnika przebiegają przy zasilaniu benzyną, a następnie istnieje możliwość pracy na benzynie lub na LPG. Przy pracy silnika na LPG również okresowo jest dawkowana benzyna w celu poprawy warunków pracy silnika ze względu zarówno na chłodzenie komory spalania dzięki parowaniu paliwa ciekłego, jak i lepsze właściwości smarne benzyny niż paliwa gazowego [6, 10, 15, 16]. Istnieje kilka generacji technicznych układów zasilania LPG, począwszy od najprostszych modeli mieszalnikowych, aż po bezpośredni wtrysk paliwa LPG w fazie ciekłej do komory spalania [2]. Algorytmy sterowania silnika (przede wszystkim dawka paliwa) są zazwyczaj przy zasilaniu paliwem LPG realizowane jako modyfikacja oryginalnych algorytmów dostosowanych do zasilania benzynowego [2]. Duże silniki o zapłonie iskrowym, powstające jako modyfikacja oryginalnych silników o zapłonie samoczynnym, mają układ zasilania jednopaliwowy – tylko na LPG [2], podobnie jak w wypadku dużych silników zasilanych gazem ziemnym. Takie rozwiązania zostały zastosowane m.in. do napędu autobusów miejskich.

Silniki o zapłonie samoczynnym na paliwo LPG występują jako silniki dwupaliwowe, zasilane oryginalną instalacją na olej napędowy z dodatkowym dawkowaniem LPG [9], podobnie jak w wypadku stosowania zasilania gazu ziemnego do silników o zapłonie samoczynnym.

Najczęściej paliwo LPG jest stosowane do zasilania silników o zapłonie iskrowym, a zatem głównie do samochodów osobowych i mniejszych lekkich samochodów ciężarowych, tzw. samochodów dostawczych.

O zainteresowaniu zastosowania paliwa LPG do zasilania silników spalinowych decydują również względy ekologiczne, typowe dla użytkowania paliw gazowych: zmniejszenie emisji

---

<sup>7</sup> m/m – udział masowy.

zanieczyszczeń [3, 8, 12–19], a – w wypadku silników o zapłonie samoczynnym – również emisji hałasu. Istotne znaczenie ma również wykorzystanie dostępnych surowców energetycznych w celu oszczędności zużycia klasycznych paliw ropopochodnych.

Oprócz wyraźnych zalet zastosowania paliwa LPG do zasilania silników spalinowych istnieje również kilka wad. Najpoważniejszą wadą jest fakt, że wytwórcy silników i samochodów nie produkują swych wyrobów oryginalnie dostosowanych do ich zasilania paliwem LPG, a zatem jest konieczne dodatkowe instalowanie w samochodach układów zasilania paliwem gazowym. Przy dzisiejszym stanie doskonałości technicznej masowych wyrobów, jakimi są samochody, jest to rozwiązanie głęboko nieprofesjonalne, nawet jeśli formalnie istnieją procedury autoryzacji takiego postępowania. Zastrzeżenia do profesjonalizmu modyfikacji układów zasilania wynikają również z faktu, że czynnikiem decydującym o powodzeniu inicjatywy rozpowszechniania zasilania silników paliwem LPG jest cena dodatkowych układów. W takim wypadku są to zazwyczaj układy z najprostszymi rozwiązaniami technicznymi, np. – w wypadku sterowania – wyłącznik z modyfikacją algorytmu sterowania dawki paliwa. Modernizacja oryginalnych układów zasilania powoduje również niekorzystne skutki w obszarze bezpieczeństwa – z tego powodu stosuje się często zakaz parkowania samochodów z instalacją LPG w garażach, mimo że paliwo LPG jest bardziej lotne niż benzyna.

Istnieją również inne niekorzystne konsekwencje stosowania do zasilania paliwa LPG. Jedną z takich konsekwencji jest wyższa temperatura spalania paliw gazowych niż paliw ciekłych, a dodatkowo praktycznie brak w paliwach gazowych dodatków poprawiających ich smarność. Powoduje to zwiększenie się zużycia niektórych elementów silników: szczególnie są narażone elementy silnie obciążone cieplnie, np. zawory, talerzyki zaworów wylotowych oraz ich wylotowe gniazda zaworowe. Eksploatacyjnym problemem jest również wrażliwość prężności pary paliwa LPG na temperaturę otoczenia ze względu na możliwość występujących różnic w składzie paliwa – prężność pary nasyconej bardzo silnie zmniejsza się w miarę zwiększania się liczby atomów węgla w poszczególnych szeregach homologicznych, np. w alkanach. Mimo licznych krytycznych ocen stosowania paliwa LPG do zasilania silników spalinowych, rozwój tej techniki jest faktem. Tym bardziej zatem jest celowe rozwiązywanie problemów, mające na celu poprawę właściwości użytkowych silników spalinowych zasilanych paliwem LPG. Najczęściej jest rozpatrywany problem zwiększonej zawartości lekkich węglowodorów alifatycznych, głównie metanu, w paliwie LPG. Metan ma bardzo dużą prężność pary nasyconej. Powoduje znaczący wpływ na wartość parametrów oceny paliwa, takich jak: względna prężność pary w temperaturze 40°C oraz temperatura, w której względna prężność pary jest nie mniejsza niż 150 kPa. Ze względu na temperaturę, w której względna prężność pary jest nie mniejsza niż 150 kPa, dodatek metanu korzystnie wpływa na jakość paliwa, jednak dodatek metanu może wpłynąć na znaczne zwiększenie się względnej prężności pary w temperaturze 40°C powyżej 1550 kPa, co stanowi zagrożenie rozszczelnienia się układu paliwowego i – w konsekwencji – również zagrożenie wybuchowe.

## 2. Paliwo LPG

Gaz ropopochodny jest mieszaniną węglowodorów łańcuchowych, głównie alkanów i alkenów, C3 i C4 z niewielką domieszką innych węglowodorów łańcuchowych C1 – C7 [1, 6, 7, 10]. W temperaturze otoczenia przy ciśnieniu (0,3 ÷ 0,5) MPa gaz ten jest magazynowany w stanie ciekłym, stąd nazwa paliwa: skroplony gaz ropopochodny oraz skrótowiec LPG, pochodzący od nazwy w języku angielskim.

Gęstość LPG mieści się w granicach (500 – 600) kg/m<sup>3</sup> [1, 6]. Wartość opałowa LPG wynosi około 46 MJ/kg [1, 6], a badawcza liczba oktanowa jest zawarta w granicach 102 – 108 [1, 6].

Gaz ropopochodny jest otrzymywany przede wszystkim w wyniku odgazolinowania gazu ziemnego, stabilizacji ropy naftowej na polu naftowym, destylacji ropy naftowej, krakingu katalitycznego i hydrokrakingu, przeróbki termicznej, reformingu, izomeryzacji, produkcji butadienu i produkcji eterów [10].

W wypadku destylacji atmosferycznej ropy naftowej wykorzystuje się różnice w temperaturze wrzenia poszczególnych związków organicznych. Po wstępnym oczyszczeniu, odwodnieniu i odsoleniu ropa naftowa jest ogrzewana w wymiennikach ciepła i następnie ulega rozdziałowi na frakcje w kolumnie destylacyjnej (wieży) pod ciśnieniem atmosferycznym. Ten rozdział i późniejszy, pod zmniejszonym ciśnieniem, nie zmieniają składu chemicznego ropy, należą więc do metod zachowawczych. Destylacja rurowo-wieżowa jest zatem metodą zachowawczą. Frakcja LPG, otrzymana metodą rurowo-wieżową, stanowi (1 – 2,5)% m/m ropy naftowej. W zależności od rodzaju surowca można otrzymać LPG o różnym składzie, np. w wypadku ropy uralskiej: około 27% m/m propanu, 20% m/m izobutanu i 51% m/m n-butanu

Uzyskany z rozdziału gaz, zawierający głównie propan i butan, jest poddawany odsiarczaniu. Proces ten polega na reakcji siarkowodoru z (15 – 20)% V/V<sup>8</sup> roztworem monoetanoloaminy, która w temperaturze (25 – 40)°C pod wysokim ciśnieniem tworzy z siarkowodorem chlorek sodu.

W procesach koksowania otrzymuje się średnio (4 ÷ 6)% m/m LPG: w procesie koksowania fluidalnego do 4% V/V, a w procesie koksowania Flexicoking do 7% V/V LPG.

Kraking katalityczny polega na reakcjach różnych frakcji olejowych lub próżniowych destylatów olejowych w zakresie temperatur (440 – 480)°C i pod stosunkowo niskim ciśnieniem ok. 0,05 MPa w obecności katalizatorów: przede wszystkim glinokrzemianów. Kraking katalityczny umożliwia uzyskanie lżejszych węglowodorów. Reakcje krakingu zachodzą w fazie fluidalnej. Podczas krakingu katalitycznego zachodzą głównie reakcje pęknięcia wiązań C – C prowadzące do powstania alkanów o mniejszej masie cząsteczkowej i w mniejszym stopniu do powstania alkenów. W wyniku krakingu katalitycznego oleju próżniowego można otrzymać (18 – 25)% m/m LPG. Siarka występuje w LPG otrzymanym w krakingu katalitycznym w postaci tioli (merkaptanów) – organicznych związków chemicznych, odpowiedników alkoholi, w których atom tlenu grupy hydroksylowej został zastąpiony atomem siarki. Tiole są usuwane z LPG w procesie Merox. Odsiarczany gaz rozdziela się metodą rektyfikacji na frakcje: propanową, propylenową i butanową.

Hydrokraking (hydrokrakowanie) jest modyfikacją krakingu, polegająca na zastosowaniu wodoru pod wysokim ciśnieniem (3 – 15) MPa i obniżeniu temperatury do (250 – 450)°C. Jako katalizator stosowane są związki molibdenu, niklu, kobaltu oraz platyna i pallad. W procesie hydrokrakingu oleju próżniowego otrzymujemy 1% m/m LPG (80% mol/mol<sup>9</sup> butany i 20% mol/mol propan), benzynę wysokooktanową, olej napędowy i opały. Zawartość masowa siarki nie przekracza 10 ppm<sup>10</sup>.

Hydroodsiarczanie surowców naftowych ze względu na skalę i znaczenie jest największym przemysłowym procesem katalitycznym realizowanym w przemyśle. We współczesnej rafinerii hydrrafinacji poddaje się praktycznie wszystkie frakcje i strumienie węglowodorowe. W procesach tych z surowca naftowego usuwa się heteroatomy oraz w pewnym stopniu następuje wysycanie wiązań nienasyconych oraz uwodornienie aromatów. Zasadniczym celem hydrrafinacji nie jest rozerwanie wiązań węgiel – węgiel, lecz wiązań węgiel – heteroatom lub też uwodornienie wiązań nienasyconych – głównie alkenowych, rzadziej aromatycznych. Przyjmuje się, że w procesie hydrrafinacji nie więcej niż 10% m/m surowca zmniejsza swą masę cząsteczkową. Hydroodsiarczanie i hydrokraking gudronu umożliwia otrzymanie

---

<sup>8</sup> V/V – udział objętościowy.

<sup>9</sup> mol/mol – udział molowy.

<sup>10</sup> ppm (ang. parts per milion) – jedna milionowa część.

(1,5–2,0)% m/m LPG (ponad 50% m/m to C3 i C4, brak jest siarkowodoru, zawartość masowa siarki jest na poziomie 50 ppm).

Z reformingu katalitycznego frakcja LPG stanowi (0,8 – 1,6)% m/m, gdzie 70% m/m to propan i n-butan, a 25% m/m to izobutan (zawartość masowa siarkowodoru nie przekracza 20 ppm, a chlorków 50 ppm).

W zależności od zastosowanych surowców i technologii, skład i – w konsekwencji – właściwości paliwa LPG mogą się znacznie różnić. W związku z tym paliwu LPG są postawione warunki jakościowe, zawarte w normie PN-EN 589 „Paliwa do pojazdów samochodowych – LPG – Wymagania i metody badań”.

### 3. Przedmiot i metoda badań

Przedmiotem badań są paliwa do silnika o zapłonie iskrowym:

- handlowe paliwo LPG,
- paliwo badawcze M1: handlowe paliwo LPG z dodatkiem metanu – zawartość metanu w paliwie badawczym 0,1% m/m,
- paliwo badawcze M2: handlowe paliwo LPG z dodatkiem metanu – zawartość metanu w paliwie badawczym 0,2% m/m.

Paliwa M1 i M2 skomponowano przez dodatek metanu technicznego do handlowego paliwa LPG.

Badania obejmowały:

- wyznaczenie składu badanych paliw z zastosowaniem chromatografii gazowej wg PN-ISO 7941:1993/Ap1:2002,
- badanie paliw na zgodność z wymaganiami normy PN-EN 589,
- badanie właściwości energetycznych i dynamicznych silnika spalinowego zasilanego paliwami badawczymi: wyznaczanie charakterystyki prędkościowej mocy użytecznej i momentu obrotowego w czasie przyspieszania samochodu na trzecim biegu,
- badanie emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa w teście NEDC (ang. *New European Driving Cycle* – nowy europejski test jezdny), składającym się z testów UDC (ang. *Urban Driving Cycle* – miejski test jezdny) i EUDC (ang. *Extra Urban Driving Cycle* – pozamiejski test jezdny) [5].

Obiektem badań na hamowni podwoziowej był samochód osobowy z silnikiem o zapłonie iskrowym o objętości skokowej 1500 cm<sup>3</sup> z instalacją LPG drugiej generacji [2].

Badania samochodu zostały przeprowadzone na stanowisku hamowni podwoziowej Schenk Komeg EMDY 48. Do badań emisji zanieczyszczeń wykorzystano stanowisko do analizy spalin, w którego skład wchodzi system Horiba Mexa 7200 wyposażony w analizatory Horiba do pomiarów stężeń: tlenku węgla (AIA-721A), węglowodorów (FIA-725A), tlenków azotu (CLA-755A), dwutlenku węgla<sup>11</sup> (AIA-722) i tlenu (MPA-720). Aparatura zastosowana do badań spełnia wymagania następujących przepisów: Dyrektywa 1999/96/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 13 grudnia 1999 r., Rozporządzenie (WE) nr 715/2007 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 20 czerwca 2007 r. oraz Rozporządzenie Komisji (WE) nr 692/2008 z dnia 18 lipca 2008 r.

<sup>11</sup> W artykule jest używane powszechnie stosowane nazewnictwo niektórych związków chemicznych, przede wszystkim dwutlenku węgla. Autorzy są świadomi, że nazwą systematyczną tego związku zgodnie z IUPAC (ang. *International Union of Pure and Applied Chemistry* – Międzynarodowa Unia Chemii Czystej i Stosowanej) jest ditlenek węgla, a w systemie Stocka tlenek węgla (IV), jednak czasopismo jest skierowane przede wszystkim do czytelników, reprezentujących dyscypliny naukowe dziedziny nauk technicznych: „Budowa i eksploatacja maszyn”, „Mechanika” i „Inżynieria środowiska”, a w mniejszym stopniu dziedziny nauk chemicznych oraz dyscyplin dziedziny nauk technicznych: „Inżynierii chemicznej” i „Technologii chemicznej”.

## 4. Wyniki badań

W tabeli 1 przedstawiono skład badanych paliw.

Tabela 1. Skład paliw

Nazwa związku	Paliwo					
	LPG		M1		M2	
	[% m/m]	[% mol]	[% m/m]	[% mol]	[% m/m]	[% mol]
Metan	< 0,1	< 0,1	0,1	0,3	0,2	0,6
Etan	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3
Etylen	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Propan	39,3	45,9	39,3	45,9	39,3	45,8
Propylen	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cis-2-buten	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Trans-2-buten	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Izobutylen	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
1-buten	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
n-butan	59,4	52,8	59,3	52,5	59,2	52,3
Izobutan	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8
n-pentan	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
n-heksan	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cyklobutan	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
3-metylopentan	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
1,3-butadien	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Izopentan	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Podstawową różnicą w składzie badanych paliw jest zawartość metanu:

- w paliwie LPG – mniej niż 0,1% m/m,
- w paliwie M1 – 0,1% m/m,
- w paliwie M2 – 0,2% m/m

W tabeli 2 przedstawiono wyniki badań paliw na zgodność z normą PN-EN 589.

**Tabela 2. Wyniki badań paliw na zgodność z normą PN-EN 589**

Oznaczany parametr	Metoda badania	Jednostka miar	Wymagania jakościowe <sup>1)</sup>	Wynik badania paliw		
				LPG	M1	M2
Motorowa liczba oktanowa	Zał. B normy PN-EN 589+A1:2012	–	min 89,0	92,0	91,7	91,2
Całkowita zawartość dienów (włączając 1,3-butadien)	PN-ISO 7941:1993/Ap1:2002	% mol	max 0,5	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Siarkowódór	PN-EN ISO 8819:2000	–	Brak	Nieobecny*	Nieobecny*	Nieobecny*
Całkowita zawartość siarki (po wprowadzeniu substancji zapachowej)	ASTM D 6667:2010	mg/kg	max 50	4,8	4,7	4,6
Badanie działania korodującego o na miedzi (1 h w temp. 40°C)	PN-EN ISO 6251:2001	klasa korozji	klasa 1	klasa 1	klasa 1	klasa 1
Pozostałość po odparowaniu	PN-EN 15471:2009	mg/kg	max 60	–	–	–
Względna prężność pary w temperaturze 40°C	PN-EN ISO 8973:2000 (wraz z zał. C normy PN-EN 589 +A1:2012)	kPa	max 1550	744	865	985
Temperatura, w której względna prężność pary jest nie mniejsza niż 150 kPa	PN-EN ISO 8973:2000 (wraz z zał. C normy PN-EN 589 +A1:2012)	°C		0 (gatunek C)	–10 (gatunek A)	–10 (gatunek A)
Zawartość wody	PN-EN 15469:2009	–	Nie wykryto	Pozytywny**	Pozytywny**	Pozytywny**
Zapach	Zał. A normy PN-EN 589 + A1: 2012 pkt.6.3.	–	Rozróżnialny i nieprzyjemny oraz wyczuwalny w powietrzu	Wyczuwalny, nieprzyjemny	Wyczuwalny, nieprzyjemny	Wyczuwalny, nieprzyjemny

			przy stężeniu wynoszącym 20% dolnej granicy wybuchowoś ci			
--	--	--	--	--	--	--

<sup>1)</sup> Zgodnie z art. 25 ust. 3 Ustawy z dnia 25 sierpnia 2006 r. o systemie monitorowania i kontrolowania jakości paliw (Dz. U. z 2006, Nr 169, poz. 1200 ze zm.) wyniki badań pobranych próbek stosuje się do jakości całej partii paliwa znajdującego się w zbiorniku, z którego pobrano próbki.

\*Zgodnie z normą PN-EN ISO 8819:2000 wynik: nieobecny oznacza, że w badanej próbce brak jest siarkowodoru.

\*\*Zgodnie z normą PN-EN 15469:2009 wynik: pozytywny oznacza, że w badanej próbce nie wykryto wody.

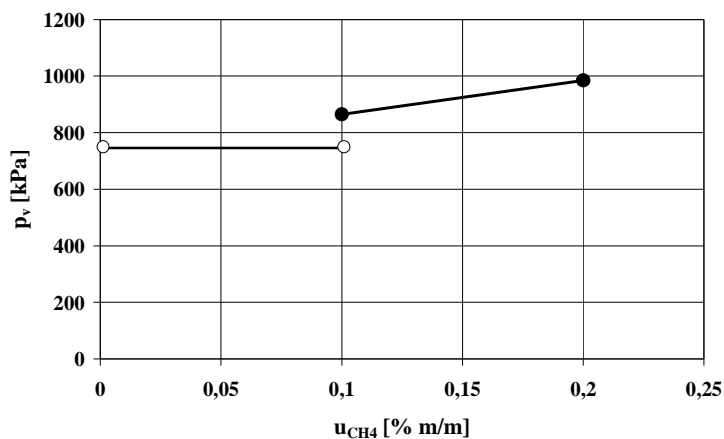
Wyniki badań potwierdzają, że nawet niewielki dodatek do paliwa LPG lekkich węglowodorów alifatycznych, które charakteryzują się dużą prężnością pary [11] – szczególnie metan, powoduje znaczne zwiększenie się prężności pary paliwa. Wszystkie badane paliwa spełniają wymagania normy PN-EN 589, w tym wymaganie względnej prężności pary – z dużym zapasem. Paliwa o zawartości masowej metanu do 0,2% m/m spełniają warunek paliw gatunku A, w odróżnieniu od paliwa LPG, spełniającego wymagania gatunku C (tabela 3).

**Tabela 3. Wymagania na poszczególne gatunki LPG według PN-EN 589+A1:2012**

Właściwości	Jednostka miar	Wymagania		Metoda badań
		min	max	
Względna prężność pary w temperaturze 40°C	[kPa]		1550	PN-EN ISO 4256 PN-EN ISO 8973 załącznik C do PN-EN 589
Temperatura, w której względna prężność pary jest nie mniejsza niż 150 kPa Gatunek A Gatunek B Gatunek C Gatunek D Gatunek E	[°C]		-10 -5 0 10 20	PN-EN ISO 8973 załącznik C do PN-EN 589

Na rysunku 1 przedstawiono zależność względnej prężności pary w temperaturze 40°C od zawartości masowej metanu w paliwie LPG.





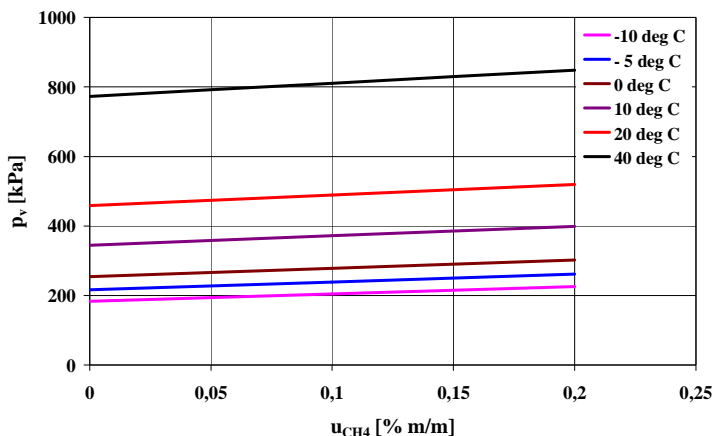
Rys. 1. Zależność względnej prężności pary w temperaturze 40°C od zawartości masowej metanu w paliwie LPG

W celu oceny wpływu dodatku metanu do paliwa LPG przeprowadzono badania symulacyjne względnej prężności pary w temperaturze 40°C zgodnie z prawem ciśnień cząstkowych Daltona. W tabeli 4 przedstawiono prężność pary podstawowych składników paliwa LPG w temperaturze (-5 ÷ 40)°C wg PN-EN 589+A1:2012.

Tabela 4. Prężność pary podstawowych składników paliwa LPG w temperaturze (-5 ÷ 40)°C wg PN-EN 589+A1: 2012

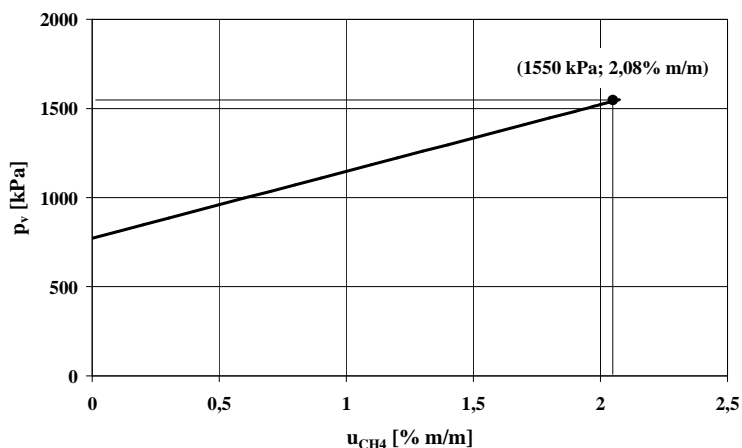
Nazwa związku	$T_{LPG}$ [°C]					
	-10	-5	0	10	20	40
	$p_v$ [kPa]					
Metan	21334	22742	24211	27333	30707	38230
Etan	1873	2128	2407	3040	3781	5613
Propan	346	405	472	630	826	1353
Izobutylen	90,17	109,5	131,9	187,6	259,9	466
n-butan	71,26	86,64	104,5	149,2	207,6	376,9
Izobutan	109,9	132,3	158,1	221,4	302,7	531

Na rysunku 2 przedstawiono prężność pary paliwa LPG z dodatkiem metanu w temperaturze (-5 ÷ 40)°C.



Rys. 2. Prężność pary paliwa LPG z dodatkiem metanu

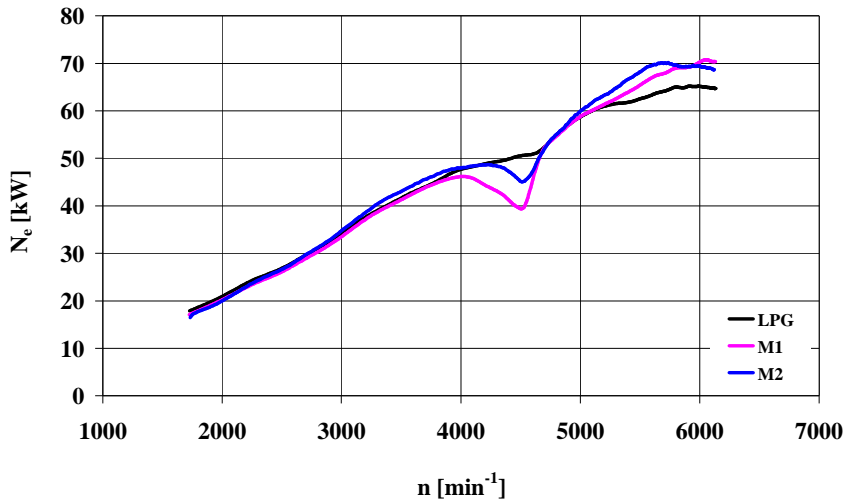
W celu wyznaczenia granicznej wartości zawartości metanu w badanym paliwie LPG ze względu na kryterium maksymalnej względnej prężności pary przeprowadzono badania symulacyjne prężności pary mieszaniny paliwa LPG i metanu w temperaturze 40°C. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 3.



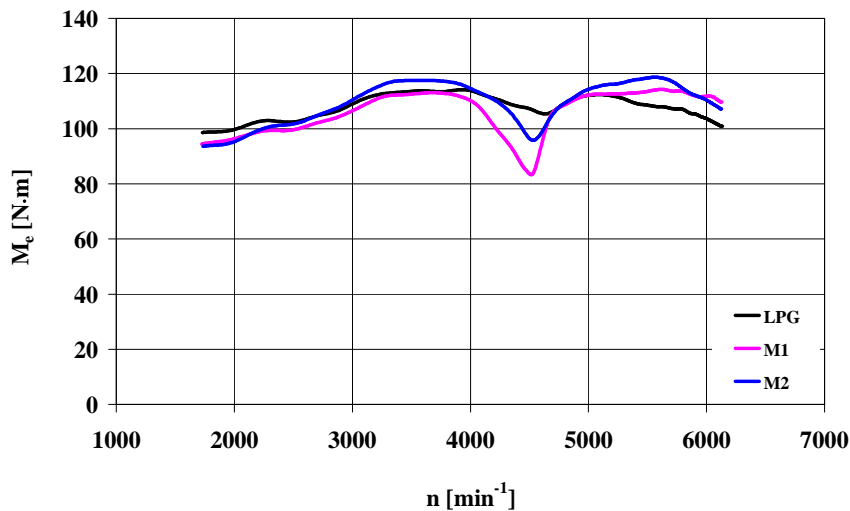
Rys. 3. Prężność pary paliwa LPG z dodatkiem metanu w temperaturze 40°C

Na podstawie przedstawionych wyników badań symulacyjnych warunek graniczny dodatku metanu do paliwa LPG zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 589 spełnia mieszanka LPG o zawartości 2,08% m/m metanu.

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono charakterystykę prędkościową mocy użytecznej i momentu obrotowego w warunkach przyspieszania samochodu na biegu czwartym.



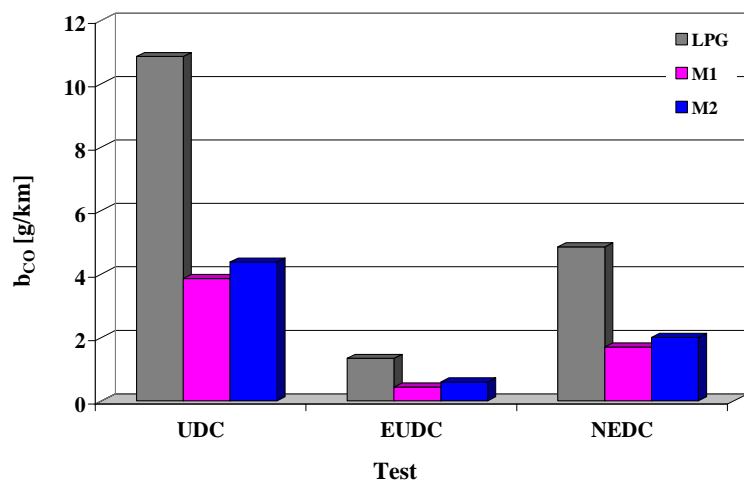
Rys. 4. Charakterystyka prędkościowa mocy użytecznej w warunkach przyspieszania samochodu na biegu czwartym



Rys. 5. Charakterystyka prędkościowa momentu obrotowego w warunkach przyspieszania samochodu na biegu czwartym

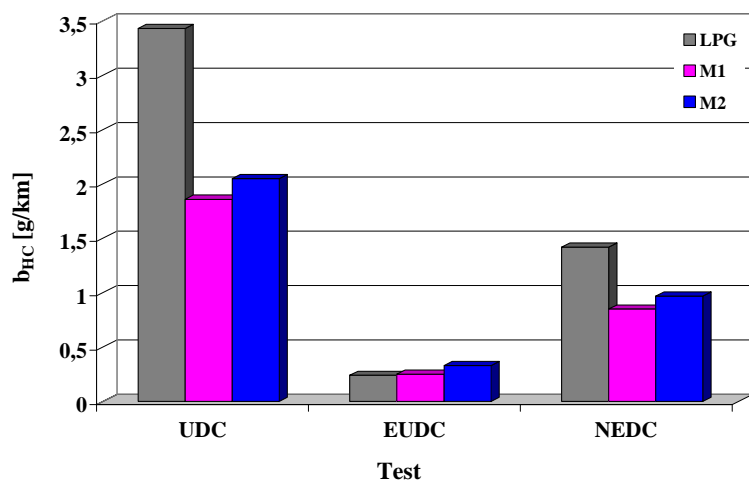
Na obydwu charakterystykach jest wyraźnie widoczny zakres prędkości obrotowej, w którym następuje przełączenie zasilania silnika z paliwa gazowego na benzynę. W zakresie prędkości obrotowej zasilania silnika paliwami gazowymi brak jest istotnych różnic charakterystyk dla badanych paliw. Oznacza to, że dodatek do paliwa LPG metanu na poziomie (0,1 ÷ 0,2)% m/m nie ma istotnego wpływu na właściwości energetyczne silnika ze względu na moc użyteczną i moment obrotowy i na właściwości dynamiczne silnika ze względu na przyspieszanie samochodu.

Na rysunkach 6–9 przedstawiono emisje drogową zanieczyszczeń w testach UDC, EUDC i NEDC.



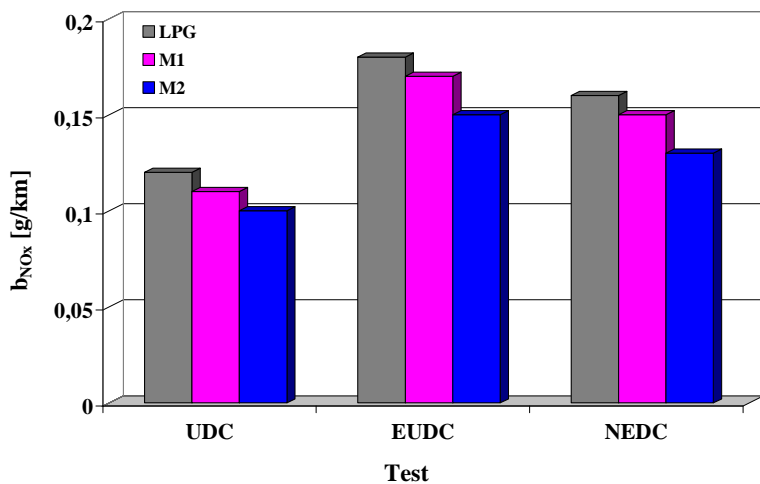
Rys. 6. Emisja drogową tlenku węgla w testach UDC, EUDC i NEDC

Dodatek metanu powoduje wyraźne ponad dwukrotne zmniejszenie emisji drogowej tlenku węgla zarówno w ruchu miejskim, jak i pozamiejskim.



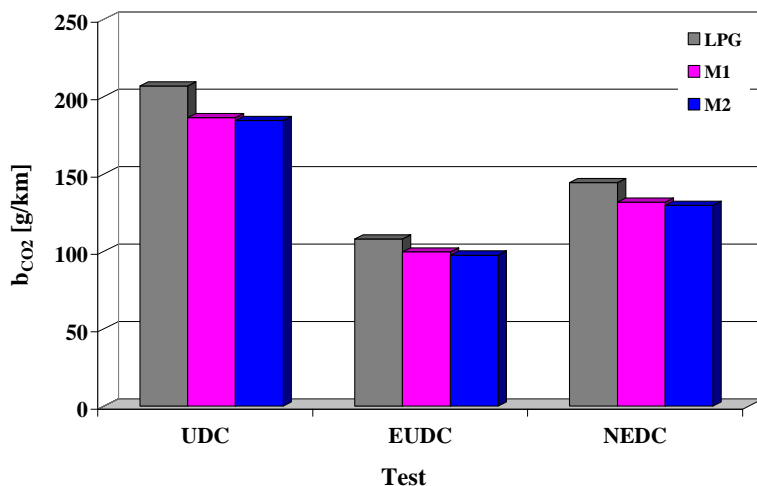
Rys. 7. Emisja drogową węglowodorów w testach UDC, EUDC i NEDC

Jest charakterystyczne, że emisja drogową węglowodorów jest mniejsza w wypadku dodatku metanu do paliwa LPG dla ruchu miejskiego, natomiast dla ruchu pozamiejskiego dodatek metanu powoduje niewielkie zwiększenie się emisji drogową węglowodorów.



Rys. 8. Emisja drogowa tlenków azotu w testach UDC, EUDC i NEDC

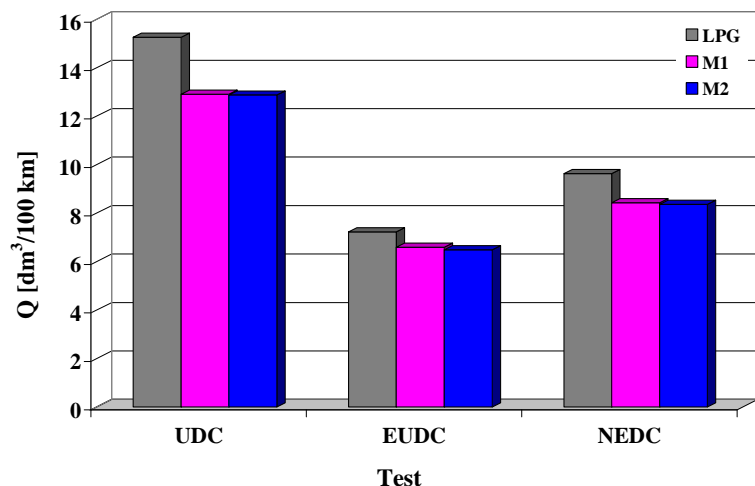
Emisja drogowa tlenków azotu zmniejsza się w przybliżeniu liniowo w miarę zwiększania się zawartości metanu w paliwie LPG.



Rys. 9. Emisja drogowa dwutlenku węgla w testach UDC, EUDC i NEDC

Również emisja drogowa dwutlenku węgla zmniejsza się w miarę zwiększania się zawartości metanu w paliwie LPG.

Na rysunku 10 przedstawiono eksploatacyjne zużycie paliwa w testach UDC, EUDC i NEDC.



Rys. 10. Eksploatacyjne zużycie paliwa w testach UDC, EUDC i NEDC

Podobnie jak w wypadku emisji drogowej dwutlenku węgla eksploatacyjne zużycie paliwa zmniejsza się w miarę zwiększania się zawartości metanu w paliwie LPG.

## 5. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że dodatek lekkich węglowodorów alifatycznych do paliwa handlowego LPG w ilości skutkującej zawartością masową metanu w paliwie do 0,2% m/m nie powoduje istotnych zmian w zakresie właściwości fizykochemicznych, warunkujących wykorzystanie badanych paliw do zasilania silników o zapłonie iskrowym. Ze względu na kryterium temperatury, w której względna prężność pary jest nie mniejsza niż 150 kPa, paliwa z dodatkiem lekkich węglowodorów alifatycznych spełniają warunek paliw gatunku A, w odróżnieniu od handlowego paliwa LPG, spełniającego wymagania gatunku C. Wymagania względnej prężności pary w temperaturze 40°C są również spełnione dla paliw z dodatkiem lekkich węglowodorów alifatycznych z dużym zapasem. Badania symulacyjne wykazują, że graniczna prężność pary w temperaturze 40°C jest osiągnięta dopiero przy dodatku metanu 2,08% m/m.

Dodatek lekkich węglowodorów alifatycznych do paliwa handlowego LPG nie powoduje istotnych różnic we właściwościach silnika spalinowego ze względu na moc użyteczną i moment obrotowy i we właściwościach dynamicznych silnika ze względu na przyspieszanie samochodu.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że nawet niewielki dodatek lekkich węglowodorów alifatycznych powoduje znaczące zmniejszenie się emisji drogowej zanieczyszczeń w homologacyjnych testach jezdnych, szczególnie tlenku węgla i węglowodorów. Stwierdzono również niewielkie zmniejszenie się zużycia paliwa dzięki dodatkowi lekkich węglowodorów alifatycznych do paliwa LPG.

Wyniki przeprowadzonych badań uzasadniają celowość sprawdzenia, jak większe dodatki metanu do paliwa LPG wpływają na właściwości użytkowe silnika. Wydaje się również interesujące rozszerzenie programu badań na dodatek wodoru do paliwa LPG.

## Literatura

- [1] Astm D1835–11: Standard specification for liquefied petroleum (LP) gases. American Society for Testing & Materials.
- [2] Auto-gas.net: Generations of autogas systems [cited 2015 Sep 15]. Available from <http://www.auto-gas.net/technology/system-types>.
- [3] Chłopek Z, Bardziński W, Jarczewski M, Sar H. Badania porównawcze samochodu osobowego zasilanego benzyną i skroplonym gazem ropopochodnym (LPG). Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. 2006: 111–120.
- [4] Davis SC, Diegel SW, Boundy RG. Transportation energy data book: edition 33. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, Tennessee, USA. 2014.
- [5] Delphi. Worldwide emission standards. Passenger cars and light duty vehicles. Innovation for the real world. 2015/2016.
- [6] Falkiner RJ. Liquefied petroleum gas. In “Fuels and lubricants handbook: technology, properties, performance, and testing”. 2nd edition: ASTM International 2003. West Conshohocken.
- [7] Górski W. Stan normalizacji LPG w Polsce – Gatunek A czy B?: Nafta-Gaz. 2010 (2): 121–127.
- [8] Lee JW, et al. Effect of various LPG supply systems on exhaust particle emission in spark-ignited combustion engine: International Journal of Automotive Technology. 2010; 11(6): 793–800.
- [9] Luft S. Dwupaliwowy silnik o zapłonie samoczynnym zasilany wtryskowo paliwem LPG w fazie ciekłej: The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2005; 2: 153–163.
- [10] Meyers R. Handbook of petrochemicals production processes: McGraw-Hill. 2004.
- [11] Pubchem compound [cited 2015 Sep 12]. Available from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pccompound>.
- [12] Qi D, et al. Combustion and exhaust emission characteristics of a compression ignition engine using liquefied petroleum gas-fuel-oil blended fuel: Energy Conversion and Management. 2006; 48(2): 500–509.
- [13] Saraf RR, Thipse SS, Saxena PK. Comparative emission analysis of gasoline/LPG automotive bifuel engine: World Academy of Science, Engineering and Technology. 2009; 3.
- [14] Tasic T, et al. Gasoline and LPG exhaust emissions comparison. Advances in Production Engineering & Management 2011. 6(2): 87–94.
- [15] Vijayabalan P, Nagarajan G. Performance, emission and combustion of LPG diesel dual fuel engine using glow plug: Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. 2009; 3(2): 105–110.
- [16] World LP gas association. Clearing the air a technical guide on autogas. Emissions, test methods, standards and technology. 2002; Paris.
- [17] World LP gas association. Health effects and costs of vehicle emissions. 2005; Paris.
- [18] Wu YY, Chen B-CH, Tran A-T. Pollutant emission reduction and engine performance improvement by using a semi-direct injection spark ignition engine fueled by LPG: Aerosol and Air Quality Research. 2012; 12: 1289–1297.

- [19] Zhang Ch, et al. A study on an electronically controlled liquefied petroleum gas-diesel dual-fuel automobile: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2005; 219(2): 207–213.