

**Mariusz Łaciak\***

**ANALIZA MOŻLIWOŚCI  
ZAMIENNOŚCI I ZMIAN JAKOŚCIOWYCH GAZÓW  
W ASPEKcie BEZPIECZNEGO UŻYTKOWANIA  
I WSPOMAGANIA ZASILANIA SIECI GAZU ZIEMNEGO  
Z ZASTOSOWANIEM  
RÓWNOWAŻNYCH MIESZANIN GAZOWYCH**

Wzrost zużycia gazu ziemnego przez odbiorców komunalnych oraz rozwój przemysłu w szczególności petrochemicznego i chemicznego sprawił, że na całym świecie wzrosło zainteresowanie zastosowaniem gazów zamiennych za gaz ziemny, zarówno jako mieszanin gazów palnych, jak i jako mieszanin gazów płynnych z powietrzem (SNG – syntetyczny gaz ziemny).

Przeprowadzane analizy ekonomiczne w wielu przypadkach dowodzą, że zapewnienie wymienności paliwa gazowego kosztowało by mniej, niż zwiększenie przepustowości gazociągów dla dostarczenia tej samej ilości gazu ziemnego. Ponadto systemy i instalacje SNG, można by uznać za inwestycje poprawiające bezpieczeństwo i elastyczność dostaw gazu.

Ciepło spalania i wartość opałowa charakteryzują ilość energii cieplnej, którą uzyskać można z jednostki objętości gazu ziemnego w procesie spalania. Wielkości te służą do obliczenia ilości energii dostarczonej odbiorcy danej partii gazu. Innym ważnym parametrem, zależnym od ciepła spalania ( $H_s$ ) i gęstości względnej ( $d$ ) gazu jest liczba Wobbego:

$$W_s = H_s / \sqrt{d}.$$

Górna i dolna liczba Wobbego są wielkościami decydującymi o tym, czy gaz ziemny może być efektywnie użytkowany w odbiorniku gazu o określonym nominalnym obciążeniu cieplnym. Zawartości głównych składników węglowodorowych (węglowodorów alifatycznych od  $C_1$  do  $C_{6+}$ ) są wielkościami, na podstawie których oblicza się ciepło spalania,

---

\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

wartość opalową, gęstość względną, współczynnik ściśliwości i górną oraz dolną liczbę Wobbego. Obliczenia te wymagają także znajomości składu frakcji węglowodorowej C<sub>6</sub> oraz zawartości wodoru i niepalnych składników gazu ziemnego, takich jak azot, dwutlenek węgla, hel oraz argon i tlen i in.

Zawartości węglowodorów aromatycznych, par rtęci i związków siarki są wielkościami, które pozwalają ocenić, czy użytkowanie gazu przez odbiorców komunalnych i przemysłowych nie stanowi zagrożenia dla zdrowia ludzi i środowiska przyrodniczego.

Zamienność gazów związana jest dodawaniem do gazu ziemnego pewnej ilości gazu będącego substytutem naturalnego gazu ziemnego przy spełnieniu kryteriów zamienności w celu zagwarantowania pewności dostaw gazu ziemnego do odbiorców. Gazy mogące być użyte w procesach mieszania i wykorzystane jako gazy zamiennicze to przede wszystkim propan lub mieszaniny propan – butan (LPG – *Liquid Petroleum Gas*), gazy wysypiskowe lub biogazy (LFG – *Landfill Gas*) oraz eter dimetylowy (DME).

Jedną z bardziej znanych mieszanek gazowych stosowanych w wielu krajach świata do wyrównywania szczytowych zapotrzebowań jest mieszanka zawierająca ok. 75% gazu ziemnego i ok. 25% mieszanki propan / powietrze (LPG / air).

Inną spotykaną mieszaniną jest mieszanka gazu ziemnego z parami eteru dimetylowego (DME). DME w postaci ciekłej może być również stosowany jako paliwo silnikowe – analogicznie jak LPG. Eter dimetylowy ma wiele zalet: obniża znacznie temperaturę zapłonu mieszaniny, poprawia efektywność spalania, obniża temperaturę płomienia – mniejsza emisja NO<sub>x</sub>. Stosowane są próby dodawania go bezpośrednio do sieci gazociągów niskiego ciśnienia.

Wraz z rosnącym zużyciem gazu, przemysł gazowniczy związany z produkcją, transportem i magazynowaniem gazu ziemnego nie zawsze i nie w każdym miejscu może zapewnić w 100% szczytowe zapotrzebowanie na to paliwo. Regulowanie zapotrzebowań szczytowych, szczególnie lokalnych i krótkoterminowych, polegających na dostarczaniu i uzupełnianiu paliwa gazowego w sieci gazowej, może być spełniane między innymi przez tzw. instalacje satelitarne regazyfikujące skroplony gaz ziemny (LNG) lub przez mieszaniny gazowe. Rozwiązania takie nie niosą za sobą konieczności przewymiarowania sieci gazowej na etapie projektowania lub jej późniejszej rekonstrukcji w celu zwiększenia jej przepustowości. Zwiększona przepustowość gazociągów niewykorzystywana poza szczytowym poborem gazu zwiększa w sposób oczywisty koszty eksploatacji sieci.

Znane dotychczasowe metody określania zamienności gazów w przyborach gazowych oparte są przede wszystkim na liczbie Wobbego, decydującej o obciążeniu cieplnym przyboru i szybkości spalania, z którą z kolei związana jest stabilność spalania. Wraz z zagrożeniem pewności dostaw gazu ziemnego w okresach szczytowego zapotrzebowania, pojawia się konieczność dodawania do sieci gazowych, mieszanin gazowych niepowodujących zmian jakościowych rozprzeczanego gazu i niemających negatywnego wpływu na bezpieczeństwo użytkowników. W wielu krajach są to mieszaniny gazu płynnego (LPG) z powietrzem. Również w Polsce przygotowywana jest zmiana przepisów w tym względzie (obecnie zawartość tlenu w sieci gazowej nie może przekraczać 0,2%). Wprowadzenie tych zmian wymagać będzie badań związanych zarówno z procesami mieszania, jak i bezpiecznego użytkowania mieszanin gazowych.

Mieszaniny propan-powietrze, (znane jako LPG-Air lub SNG) są w istocie syntetycznym gazem ziemnym, który jest utworzony przez wymieszanie odparowującego LPG z powietrzem, najczęściej w stosunku ok. 45% powietrza i ok. 55% gazu (LPG lub propan). Po wymieszaniu powstaje jednorodna mieszanka, która może zostać wykorzystana jako bezpośredni zamiennik za gaz ziemny (do 25% strumienia gazu), w procesach spalania m.in. do regulacji zapotrzebowań szczytowych. Wiele procesów przemysłowych wykorzystujących paliwo gazowe przebiega w sposób ciągły. Jakiegokolwiek przerwy w dostawie paliwa mogą powodować zatrzymanie produkcji i poniesienie w wyniku tego, znacznych strat ekonomicznych. W zakładach przemysłowych tego typu branż wymagane jest często posiadanie alternatywnego źródła energii na wypadek zaistnienia ryzyka przerwania dostawy tego rodzaju energii. W niektórych przypadkach, jak to jest np. w przemyśle szklarskim, brak paliwa powoduje nie tylko straty w produkcji, ale i straty w inwestycjach kapitałowych. Takim źródłem mogą być właśnie instalacje mieszania gazu propan – powietrze, czyli produkujące gaz syntetyczny (SNG) jako zamienny za gaz ziemny. W przeciwieństwie do oleju napędowego, oleju opałowego lub propanu, SNG nie wymaga dodatkowych urządzeń gazowych, rurociągów, regulatorów, czy też specjalnych systemów odbioru paliwa w fabryce. Rurociąg zasilający może być podłączony do rurociągu gazu ziemnego zaraz za stacją pomiarową (oraz stacją redukcyjną), przed wejściem do budynku (-ów).

Rozwój techniki budowy zbiorników i instalacji do magazynowania LNG umożliwia przeprowadzenie gazyfikacji mniejszych miast i osiedli położonych w rejonach pozbawionych rurociągów przesyłowych. Z większych instalacji skroplony gaz ziemny dostarczany jest najczęściej środkami transportu drogowego lub kolejowego. Rosnące zainteresowanie skroplonym gazem ziemnym (LNG) w Polsce związane z budową terminala rozładunkowego LNG oraz stopniowy rozwój instalacji satelitarnych LNG zasilających niepołączone z siecią gazową skupiska ludzkie, czy też odbiorców przemysłowych zwraca uwagę na konieczność regulowania jakości tego gazu przed skierowaniem go do odbiorcy. Wymagać to będzie określonych badań zakresu zmian jakościowych gazu wynikających z ewentualnego mieszania gazu.

Jednym z najtańszych źródeł energii odnawialnej jest LFG powstający samorzutnie (gaz wysypiskowy) lub celowo (biogaz) z materii organicznej. Gaz ten po oczyszczeniu i uzdatnieniu mógłby zostać wykorzystany jako zamiennik gazu ziemnego w procesach spalania zarówno przez odbiorców komunalno-bytowych, jak i w przemyśle.

Gazy pozyskiwane z nowych źródeł nie spalają się prawidłowo w dotychczas stosowanych przyborach gazowych, mimo że ich właściwości odpowiadają obowiązującym normom lub spalają się dobrze, pomimo że nie odpowiadają tym normom. W związku z powyższym, opracowano nowe kryteria oceny i zamienności gazów.

Przyjmuje się, że gazy są wymienne między sobą, jeżeli palą się bez zakłóceń w tych samych przyborach, przy tym samym ciśnieniu i gdy zachowane są następujące warunki:

- Obciążenie cieplne przyboru gazowego nie ulega zmianom. Skład gazu, a także ilość zassanego powietrza pierwotnego mają istotny wpływ na dotrzymanie powyższych warunków. Zachowanie tego warunku jest zapewnione w przypadku gdy liczba Wobbe'go dla obu gazów ma tę samą wartość. Dopuszcza się odchylenia w granicach  $\pm 5,0\%$ .

- Płomień pali się stabilnie, nie wykazuje skłonności do odrywania się lub przeskakiwania do wnętrza palnika. Stabilność płomienia zależy od maksymalnej szybkości spalania gazu oraz współczynnika zassania powietrza. Przy jego wzroście stabilność płomienia maleje.
- Spalanie powinno być zupełne. W spalinach zawartość tlenku węgla nie powinna przekraczać ilości dopuszczalnych. Niecałkowite spalanie objawia się występowaniem w spalinach tlenku węgla oraz żółtymi końcami płomieni. Dopuszczalne stężenie tlenku węgla w nierozcieńczonych spalinach wynosi  $0,1 \pm 0,05\%$  obj. Graniczną wartość tego gazu określa się również stosunkiem stężeń tlenku węgla do dwutlenku węgla, który nie powinien przekraczać wartości 0,01.

Sposoby określające wymiennność gazów charakteryzują dany gaz w odniesieniu do opisanych wyżej zjawisk za pomocą wskaźników liczbowych lub za pomocą diagramów wymienności, na których gaz jest scharakteryzowany przez położenie punktu w układzie współrzędnych.

Najbardziej znaną metodą określenia zamienności gazów jest metoda Delbourga, w której gaz scharakteryzowany jest przez:

- skorygowaną (rozszerzoną) liczbę Wobbego,
- potencjał spalania,  $D$ ,
- współczynnik tworzenia się sadzy,  $I_{ch}$ ,
- współczynnik powstawania żółtych końców,  $I_f$ .

Dwa ostatnie współczynniki zależą od ilości węglowodorów zawartych w gazie.

Uniwersalnym sposobem określenia zamienności gazu jest metoda rachunkowa Weavera. Nie wymaga ona określenia gazu odniesienia. Przeznaczona jest dla przyborów gazowych użytku domowego i ciśnienia gazu  $p = 1,25$  kPa. Zamiennność określa się przez obliczenie sześciu wskaźników dla dwóch gazów, z których jeden przyjmuje się jako gaz odniesienia. Jeżeli wymienione wskaźniki zamienności, z których:

- dwa dotyczą obciążenia cieplnego przyboru gazowego,
- dwa – stabilizacji płomienia,
- dwa – jakości spalania, czyli tworzenia się sadzy oraz tlenku węgla

i wartości ich mieszczą się w podanych przez Weavera granicach, to gazy są zamienne względem siebie.

Wskaźniki Weavera to:

- Wskaźnik zamienności dla obciążenia cieplnego –  $I_H$ ,
- Wskaźnik wymienności dla zassania powietrza pierwotnego –  $I_A$ ,
- Wskaźnik wymienności dla cofania płomienia  $I_F$ ,
- Wskaźnik wymienności dla odrywania się płomienia –  $I_L$ ,
- Wskaźnik wymienności dla tworzenia tlenku węgla –  $I_P$ ,
- Wskaźnik wymienności dla występowania żółtych końców –  $I_Y$ .

Kryteria zmienności gazów i definicja zamienności w praktyce dotyczy spalania gazów w przyborach gazowych. W przypadku wymiany gazu w piecach przemysłowych kryteria zamienności są zazwyczaj mało przydatne z powodu innych warunków spalania i wymiany ciepła. W przemysłowych piecach grzewczych gaz spala się w zamkniętych komorach spalania. Dopływ powietrza jest regulowany. Spaliny odprowadzane są kanałami i kominem do atmosfery. Różnica temperatur nagrzewanego wsadu (paliwa gazowego) i płomienia jest dużo mniejsza niż w przypadku przyborów gazowych domowego użytku. W piecach wymiana ciepła odbywa się głównie przez promieniowanie w 85% do 95%. Wartość strumienia ciepłego płynącego od gazu do ogrzewanego wsadu nie jest proporcjonalna do obciążenia ciepłego palników. Ciepło dostarczane przez promieniowanie w przybliżeniu wzrasta proporcjonalnie do czwartej potęgi temperatury źródła promieniowania. Na wynik procesu wygrzewania ma w piecach zasadniczy wpływ kalorymetryczna temperatura spalania gazu dostarczanego do pieca.

W literaturze przedmiotu znaleźć można szereg opracowań dotyczących wykorzystania LFG zarówno w postaci biogazów, jak i gazów wysypiskowych. W przypadku gazu wysypiskowego, powstaje on przez beztlenowy rozkład odpadów komunalnych (MSW – *Municipal Solid Waste*) na składowiskach i składa się głównie z metanu ( $\text{CH}_4$ ) i dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ) oraz z mniejszych ilości azotu i tlenu, a także pewnej liczby śladowych ilości lotnych związków organicznych (VOCs – *Volatile Organic Compounds*). Ostatnio wykorzystanie LFG spotyka się ze sporym zainteresowaniem jako alternatywne źródło energii do produkcji ciepła, energii elektrycznej lub paliw. Produkcja LFG zazwyczaj rozpoczyna się natychmiast po osadzeniu składowiska MSW i osiąga szczyt wydajności produkcji po około 10 latach, trwając przez 40 lat lub dłużej. Innym źródłem LFG mogą być biogazy produkowane celowo w biogazowniach. Jakość LFG jako paliwa rośnie wraz ze wzrostem zawartości  $\text{CH}_4$  i jego skład może znacznie się różnić w zależności od rodzaju składowiska, upływu czasu, metody obróbki wstępnej itp. Wartość opałowa LFG waha się zazwyczaj w granicach od 12,56 do 25,12 MJ / m<sup>3</sup>, co wystarcza do wykorzystania go jako paliwa w różnych systemach ciepłych, jednak metody te mogą różnić się w zależności jakości LFG.

Dotychczas przeprowadzone badania dotyczyły m.in. wpływu  $\text{CO}_2$  zawartego w LFG na prędkości spalania, na zawężanie granic palności i wybuchowości oraz na emisję zanieczyszczeń. Qin i in (2001) przeprowadzili kompleksowe badania podstawowe i środowiskowe na temat wykorzystania LFG do wytwarzania energii. W innych badaniach, Lee i in. (2008) zaproponowali nowe korelacje określania prędkości spalania paliw LFG i LFG – LPG w funkcji stosunku równoważności. Odkryli, że zawartość  $\text{CO}_2$  w LFG wpływa na zwiększenie strat ciepła przez promieniowanie w niskich płomieniach przy jednoczesnym obniżeniu emisji  $\text{NO}_x$ . Lee i Hwang (2007) badali stabilność płomieni przy spalaniu mieszanin LFG/LPG w urządzeniach gazowych gospodarstwa domowego oraz w przemysłowych palnikach wirowo-strumieniowych bez wstępnego mieszania gazu i powietrza. Badaniom zostały poddane różne rodzaje mieszanin gazowych, które tak dobrano, aby uzyskać wartości liczby Wobbego ( $W_g$ ) i wartości opałowej ( $H_i$ ) równoważne odpowiednio wartościom charakterystycznym dla gazu ziemnego (grupa E). W badaniach, żądane

własności LFG używane do produkcji mieszanin gazowych były uzyskiwane przez dobierane różnych składów objętościowych  $\text{CH}_4$  w zakresie od 55% do 30% w mieszaninie tworzącej LFG. Podstawowe cechy paliw zostały osiągnięte poprzez porównanie temperatury płomienia, prędkości spalania oraz stabilności ich spalania. Celem było określenie, czy mieszaniny mają podobne stabilne strefy płomienia niezależnie od jakości LFG i czy paliwa te mogą w pełni zastąpić  $\text{CH}_4$ , bez żadnych modyfikacji urządzeń zasysających powietrze do spalania. Metodyka badań obejmowała między innymi: porównanie stabilności spalania LFG i mieszanin paliw LFG-gaz ziemny. Przeprowadzone zostały eksperymenty z określaniem prędkości spalania i wyznaczaniem stref stabilnych płomieni zarówno z użyciem palników stosowanych w gospodarstwach domowych, jak i stabilności płomienia w palnikach przemysłowych bez wstępnego mieszania się gazu i powietrza. Profile temperatur paliw mieszanych okazały się podobne o czystego  $\text{CH}_4$ . Chociaż LFG zawiera do około 45% obcych gazów takich jak  $\text{CO}_2$  i  $\text{N}_2$ , uzyskano stosunkowo wysokie temperatury płomieni, tj. około 1900 K. Obliczenia termodynamiczne i uzyskane wyniki obliczeń zarówno szybkości spalania, jak i stabilności płomienia potwierdziły, że mieszaniny LFG/LPG mogą być stosowane wymiennie z gazem ziemnym bez zmian w urządzeniach spalających gaz.

W doświadczeniach szczególną uwagę poświęca się do określenia podstawowych właściwości mieszanin palnych, a mianowicie laminarnej szybkości spalania, minimalnej energii zapłonu, opóźnienia zapłonu, granic palności oraz średnic wygaszania. Ich wartości zależą głównie od rodzaju i składu mieszanki, temperatury, ciśnienia, itp.

Określenie szybkości spalania jest jednym z podstawowych obliczeń dotyczących zamienności paliw gazowych. Ocenę użyteczności propanu i LPG jako składników mieszanin wykorzystywanych jako zamiennych przeprowadzili m. in. (Huzayyin i in. 2007). Dotyczyła ona w szczególności zmian w laminarnej szybkości spalania ( $S_L$ ) oraz wyznaczenia tzw. „indeksu wybuchu” ( $K_G$ ) mieszanin LPG/powietrze i propan/ powietrze w szerokim zakresie stosunku stężeń ( $\Phi \approx 0.7\text{--}2.2$ ), temperatury początkowej ( $T_i = 295\text{--}400$  K) i ciśnienia ( $P_i = 50\text{--}400$  kPa). W tym celu skonstruowano cylindryczny zbiornik ciśnieniowy – „bombę”, do prowadzenia badań. Szybkość spalania określono za pomocą różnych modeli w zależności od zmian ciśnienia ( $P\text{--}t$ ) centralnego zapłonu procesu spalania przy minimalnej energii zapłonu.

$$K_G = (dP/dt)_{\max} V^{1/3} = (36\Pi)^{1/3} (P_k - P_i) \left( \frac{P_k}{P_i} \right)^{1/T} S_L,$$

$$S_L = S_{LO} (T/T_0)^\alpha (P/P_0)^\beta,$$

gdzie  $(dP/dt)_{\max}$  to maksymalna szybkość wzrostu ciśnienia wybuchu,  $S_{LO}$ ,  $P_0$  i  $T_0$  to odpowiednio szybkość spalania, ciśnienie i temperatura w warunkach normalnych. Jak wykazały badania maksymalna szybkość spalania laminarnego dla propanu wynosiła 455 mm/s przy  $\Phi = 1,1$ , natomiast dla LPG 432 mm/s ( $\Phi \approx 1,5$ ). Maksymalny wskaźnik eksplozji, powszechnie nazywany „parametrem nasilenia eksplozji” lub „indeksem wybuchu” ( $K_G$ ),

jest wielkością stałą dla gazów palnych tworzących mieszaninę wybuchową i oblicza się go na podstawie szybkości spalania laminarnego ( $S_L$ ) i wynosi on 93 bar m/s dla propanu, i prawie 88 bar m/s dla LPG.

Określając parametry wybuchu mieszanin, można stwierdzić, że dla niskich wartości ciśnień początkowych  $P_i$ , maksymalne ciśnienie wybuchu  $P_{\max}$  dla mieszanin z propanem osiąga wartości wyższe niż dla LPG, jednak wraz ze wzrostem ciśnienia  $P_i$ , sytuacja się zmienia i  $P_{\max}$  dla mieszanin z LPG staje się większe. Maksymalna wartość wzrostu ciśnienia wybuchu  $(dP/dt)_{\max}$  dla propanu jest o ok. 20% większa niż dla LPG (zależy od składu). Znaczenie wzrostu ciśnienia  $P_i$  na indeks wybuchu  $K_G$  jest zdecydowanie większe od wpływu wzrostu temperatury  $T_i$ .

Te i inne wyniki wskazywałyby wyraźnie na propan jako na gaz mający więcej cech predysponujących go do stosowania w procesach zamiany niż LPG. Niewątpliwie jedną z nich jest brak butanu stanowiącego jeden ze składników LPG. Przyczyną tego może tu być znacznie większy od innych składników ciężar właściwy butanu uniemożliwiający dokładne zmieszanie gazów.

Reasumując, na podstawie analizy badań można więc stwierdzić, że:

- (a) Mieszaniny propan-powietrze (znane jako LPG-Air lub SNG), mogą zostać wykorzystane jako bezpośredni zamiennik za gaz ziemny w procesach spalania m.in. do regulacji zapotrzebowań szczytowych (w odpowiedniej proporcji i stężeniu).
- (b) Jednym z najtańszych źródeł energii odnawialnej jest LFG powstający samorzutnie (gaz wysypiskowy) lub celowo (biogaz) z materii organicznej. Wartość opałowa LFG waha się zazwyczaj w granicach od 12,56 do 25,12 MJ/mn<sup>3</sup>.
- (c) Adiabatyczne temperatury płomieni wszystkich mieszanin typu LFG/LPG są bardzo podobne do profili temperaturowych CH<sub>4</sub>, jednak wartości tych temperatur spadają ze zmniejszeniem się procentowej zawartości CH<sub>4</sub> w mieszaninie z LFG.
- (d) Prędkość maksymalna spalania paliw mieszanych spada liniowo wraz ze spadkiem zawartości CH<sub>4</sub> w LFG. Jednak nawet w przypadku mieszaniny, wykonanej z udziałem LFG o zawartości około 70% gazów obojętnych, pomiary szybkości spalania wskazują, że może być ona wykorzystana w dowolnym układzie spalania.
- (e) Większość mieszanin LFG/LPG ma bardzo podobne stabilne strefy płomienia niezależnie od jakości LFG i mogą one zastąpić całkowicie CH<sub>4</sub> bez żadnych modyfikacji urządzeń gazowych.
- (f) Stabilność strefy płomienia mieszanin spada wraz ze spadkiem zawartości CH<sub>4</sub> w LFG. Mieszanina LFG/LPG może zastąpić CH<sub>4</sub> całkowicie lub z pewnymi ograniczeniami obejmującymi np. regulację palnika zasysającego powietrze do spalania.
- (g) Maksymalna wartość wzrostu ciśnienia wybuchu  $(dP/dt)_{\max}$  dla propanu jest o ok. 20% większa niż dla LPG, natomiast maksymalne ciśnienie wybuchu  $P_{\max}$  przy wyższych ciśnieniach początkowych  $P_i$  jest większe dla LPG.
- (h) Lepsze wyniki we wszystkich doświadczeniach związanych z wymiennością gazów, osiąga się w przypadku zastosowania mieszaniny o niskiej zawartości lub o całkowitym braku butanu jako składnika w LPG (propan techniczny jako LPG).

- (i) Różnica gęstości (ciężarów właściwych) składników mieszanin gazowych stosowanych w procesach zmienności gazów, stanowić może w pewnych warunkach istotny problem, niedostrzegany czasem na etapie projektowania procesu.
- (j) Prowadzone próby dodawania eteru dimetylowego (DME) bezpośrednio do sieci gazociągów niskiego ciśnienia dają pozytywne wyniki. DME jako paliwo gazowe ma wiele zalet: obniża znacznie temperaturę zapłonu mieszaniny DME/gaz ziemny (niższa energia aktywacji), poprawia efektywność spalania, obniża temperaturę płomienia – mniejsza emisja  $\text{NO}_x$ . Inne zalety poza wymiennością metanu to łatwość transportu i bezpieczeństwo dostaw.
- (k) Pierwszym i podstawowym kryterium zmienności gazów niezmiennie pozostaje zachowanie stałości liczby Wobbego ( $\pm 5,0\%$ ).

## LITERATURA

- [1] Grzybczyk B., Łaciak M., Grela I.: *Energetyka gazowa. Obsługa i eksploatacja urządzeń i sieci*. Wyd. Tarbonus, Tarnobrzeg – Kraków 2008
- [2] Łaciak M. i in.: *Instalacje i sieci gazowe*. Wyd. Verlag Däshofer, Warszawa 2010
- [3] Lee C.E., Hwang C.H., Lee H.Y.: *A study on the interchangeability of LFG-LPG mixed fuels with LFG quality in domestic combustion appliances*. Fuel, 87, 2008
- [4] C.E. Lee, C.H. Hwang.: *An experimental study on the flame stability of LFG and LFG-mixed fuels*. Fuel, 86, 2007
- [5] Lee C.E., Oh C.B., Jung I.S., Park J.: *A study on the determination of burning velocities of LFG and LFG – mixed fuels*. Fuel, 81, 2002
- [6] Lee C.E., Lee S.R., Han J.W., Park J.: *Numerical study on effect of  $\text{CO}_2$  addition in flame structure and  $\text{NO}_x$  formation of  $\text{CH}_4$ -air counter flow diffusion flames*. Int. J. Energy Res., 25, 2001
- [7] Qin W., Egolfopoulos F.N., Tsotsis T.T.: *Fundamental and environment aspects of landfill gas utilization for power generation*. Chem. Eng. J., 82, 2001
- [8] Qin W., Egolfopoulos F.N., Tsotsis T.T.: *A detailed study of the combustion characteristics of landfill gas*. WSS/CI 1999 Fall Meeting 1999:99F-033, 1999
- [9] Huzayyin A.S., Moneib H.A., Shehatta M.S., Attia A.M.A.: *Laminar burning velocity and explosion index of LPG – air and propane – air mixtures*. Fuel, 87, 2008
- [10] Johnson F., Rue D.M.: *Gas interchangeability tests: Evaluating the range of interchangeability of vaporized LNG and natural gas*. Final Report, Gas Research Institute, GRI-03/0519, 2002
- [11] Eaton G.D.: *Peak Shaving with Synthetic Natural Gas*. Ely Energy 2005
- [12] Ruffcorn S., Feinberg K.: *Propane – air standby systems: gas energy uninterrupted*. EsMagazine 2001
- [13] Marchionna M., Patrini R., Sanfilippo D., Migliavacca G.: *Fundamental investigations on di-methyl ether (DME) as LPG substitute or make-up for domestic uses*. Fuel Processing Technology, vol. 89, Issue 12, 2008



- [14] Halchuk R.A.: *Gas Quality Specifications and Interchangeability for End Use Applications*. AGA Operations Conference, Dallas, TX, 2001
- [15] Williams T.A.: *Technical background and Issues of Gas Interchangeability*. AGA Staff Paper, 2006
- [16] Technical Report Page 5.1 Title: 2007 Annual Technical Report to TransCanada PipeLines Ltd. TR 2103 5.0 Gas Interchangeability Program, NOVA Chemicals, 2007
- [17] White Paper on Natural Gas Interchangeability and Non-Combustion End Use, NGC+ Interchangeability Work Group, February 28, 2005