

dr inż. **Rafał POROWSKI**¹
mgr inż. **Wojciech RUDY**²
prof. dr hab. inż. **Andrzej TEODORCZYK**²

Przyjęty/Accepted: 08.04.2013; Zrecenzowany/Reviewed: 11.09.2013; Opublikowany/Published: 30.09.2013

BADANIA DOŚWIADCZALNE I NUMERYCZNE TEMPERATURY ZAPŁONU WYBRANYCH MIESZANIN CIECZY PALNYCH

Experimental and Numerical Study on Flash Point for Selected Liquid Fuel Blends

Streszczenie

Artykuł zawiera rezultaty badań doświadczalnych oraz obliczenia numeryczne wyznaczenia wartości temperatury zapłonu (*flash point*) dla wybranych mieszanin cieczy palnych. Badania doświadczalne przeprowadzono w standardowym urządzeniu badawczym firmy Walter Herzog GmbH, typ HFP-339, działający w oparciu o metodę Pensky-Martens [5]. Badania numeryczne zrealizowano w opracowanym przez autorów kodzie numerycznym przy wykorzystaniu MS Excell i Visual Basic, z wykorzystaniem modeli dla mieszanin idealnych i nieidealnych. Wykonano również analizę porównawczą uzyskanych wyników.

Summary

This paper presents results on the experimental and numerical study on flash point for selected liquid fuel blends. The experimental part was done with the use of testing apparatus from Walter Herzog GmbH, type HFP-339 for Pensky-Martens methodology. The numerical study was conducted by our home-made software using MS Excell and Visual Basic scripts for ideal and non-ideal mixtures. As a conclusion the analysis of both experimental and numerical results was reported.

Słowa kluczowe: temperatura zapłonu, ciecze palne, spalanie cieczy, wybuchowość;

Keywords: flash point, flammable liquids, combustion of liquids, explosibility;

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy;

Type of article: original scientific article;

1. Wstęp

Odkrycie ropy naftowej oraz narastające w XIX wieku wykorzystywanie do oświetlenia i ogrzewania palnych destylatów w miejsce tłuszczów roślinnych i zwierzęcych doprowadziło do występowania dużej ilości wybuchów oraz pożarów związanych z niewłaściwym stosowaniem tych substancji [1]. Z uwagi na bezpieczeństwo transportu i magazynowania substancji palnych parametry wybuchowości takie jak granice wybuchowości, minimalna energia zapłonu, czy minimalna temperatura zapłonu są od

wielu lat badane przez instytuty badawcze na całym świecie, a także stosowane jako kryteria bezpieczeństwa w kartach charakterystyk ciekłych paliw samochodowych oraz lotniczych. Obowiązek posiadania przez producentów i dystrybutorów kart charakterystyk substancji niebezpiecznych dla paliw samochodowych i lotniczych zapewnia odbiorcom tych paliw wiedzę o potencjalnych zagrożeniach pożarowo-wybuchowych, a także ułatwia proces projektowania i doboru technicznych systemów zabezpieczeń związanych z transportem oraz magazynowaniem tych paliw. Brak wiedzy na ten temat zwiększa ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych, niejednokrotnie o katastroficznych skutkach, tj. pożarów, czy wybuchów, do których może dojść podczas niewłaściwego magazynowania, użytkowania, czy też transportu tych paliw.

Głównym zagrożeniem związanym z magazynowaniem i transportem cieczy palnych jest możliwość ich odparowania i tym samym powstanie atmosfery wybuchowej w postaci par cieczy z powietrzem, w stężeniu pomiędzy dolną a górną granicą

¹ Zespół Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpowodzi Państwowy Instytut Badawczy, ul. Nadwiślańska 213, 05-420 Józefów, Polska; rporowski@cnbop.pl / Combustion Processes and Explosion Laboratory at Scientific and Research Centre for Fire Protection – National Research Institute, Poland;

² Instytut Techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa, Polska/ Institute of Heat Engineering, Warsaw University of Technology, Poland;

wybuchowości [2]. Jednym z parametrów wybuchowości, którego wartości z uwagi na bezpieczeństwo transportu standardowo podawane są w kartach charakterystyk dla paliw ciekłych, jest tzw. flash point, tj. temperatura zapłonu. Parametr ten definiuje się jako minimalną temperaturę cieczy, w której tworzy się atmosfera wybuchowa par cieczy z powietrzem, w pobliżu powierzchni cieczy lub wewnątrz urządzenia badawczego (w zależności od stanowiska badawczego) [3].

2. Badania doświadczalne

Badania doświadczalne określenia temperatury zapłonu (inaczej flash point) przeprowadzono w standardowym urządzeniu badawczym firmy Walter Herzog GmbH, typ HFP 339, działający w oparciu o metodę Pensky-Martens, tj. metodę ZT [5]. Badania polegały na umieszczeniu badanej próbki w tyglu do określonego normą znaku. Próbka w tyglu była następnie podgrzewana ze stałą prędkością przy ciągłym mieszaniu. W regularnych odstępach czasu do tygla wkładany był niewielki płomień gazowy lub elektryczny zapłonnik, przy jednoczesnym przerwaniu procesu mieszania. Na Ryc. 1 przedstawiono stanowisko badawcze do pomiarów parametru flash point wraz z opisem poszczególnych elementów składowych stanowiska.

Blok grzejny z tygłem są umieszczone w dolnej części urządzenia. Tygiel wraz z pokrywą jest zgodny z wymaganiami znormalizowanych metod badawczych. Do obudowy urządzenia jest przymo-

cowany pojemnik na tygiel. Terminale elektryczne i gniazda połączeniowe urządzeń peryferyjnych (np. drukarka) znajdują się z tyłu urządzenia badawczego. W urządzeniu badawczym zastosowano zapłonnik elektryczny. Zapłon jest rejestrowany termicznie poprzez czujnik zapłonu.

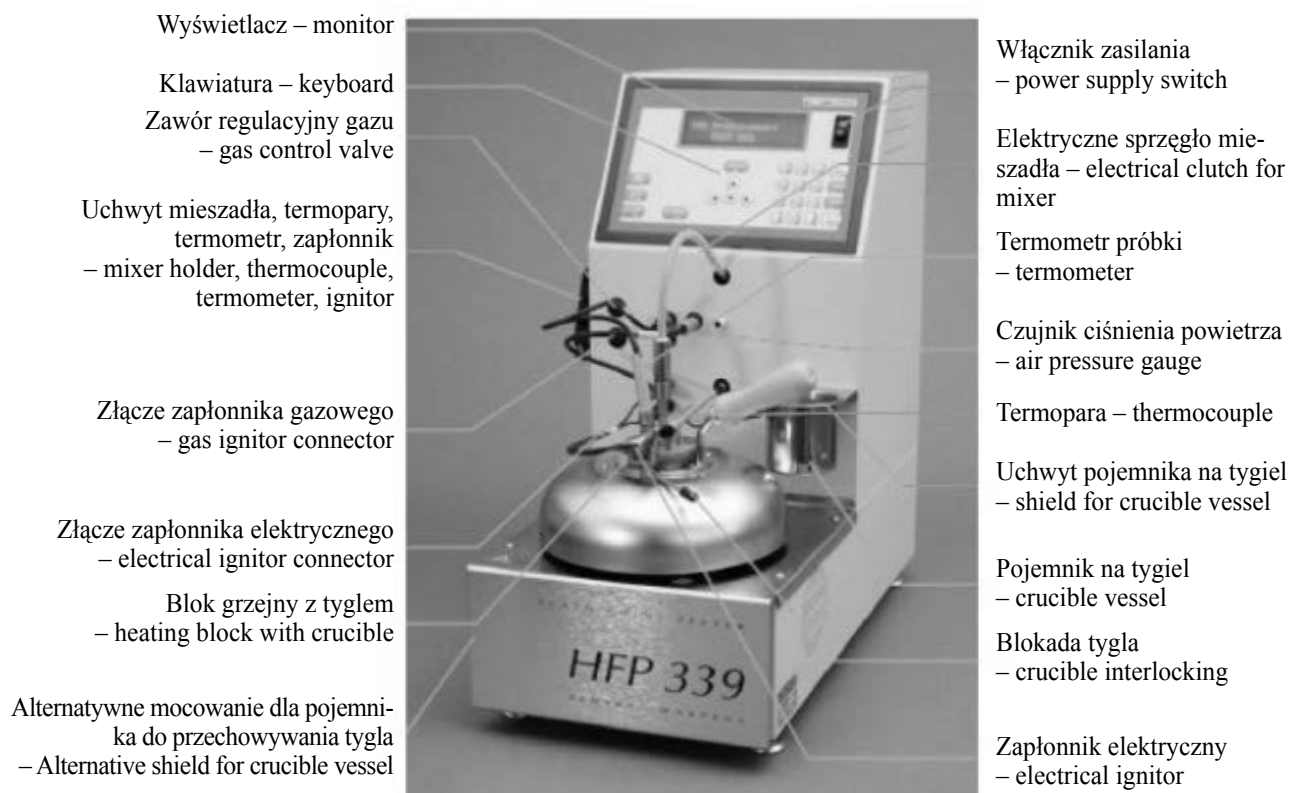
Najniższa temperatura, w której przyłożenie źródła zapłonu spowoduje zapłon par badanej cieczy i szerzenie się płomienia ponad powierzchnią cieczy, rejestrowana jest przez urządzenie jako temperatura zapłonu pod ciśnieniem atmosferycznym otoczenia, czyli wartość parametru flash point. Temperaturę tę koryguje się na normalne ciśnienie atmosferyczne, stosując odpowiednie równanie.

Badania doświadczalne przeprowadzono w temperaturze otoczenia oraz przy ciśnieniu atmosferycznym. Badania przeprowadzono dla mieszanin następujących cieczy palnych:

- 1-butanol + alkohol metylowy (50% / 50%),
- 2-butanol + alkohol etylowy (50% / 50%),
- heptan + 1-butanol (50% / 50%),
- heptan + 2-butanol (50% / 50%).

W Tabeli 1 przedstawiono zebrane dane literaturowe [3], a w Tabeli 2 wyniki badań dla temperatur zapłonu cieczy palnych i ich mieszanin.

Przeprowadzone badania doświadczalne wskazują na fakt, że mieszaniny cieczy palnych zawierające ciecze o ujemnych wartościach parametru flash point drastycznie obniżają wartość tego parametru dla całej mieszaniny.



Ryc. 1. Stanowisko badawcze HFP 339 firmy Walter Herzog GmbH wraz z poszczególnymi elementami składowymi
Fig. 1. Experimental set-up of HFP 339 by Walter Herzog GmbH including apparatus components

Tabela 1.
Literaturowe wartości temperatury zapłonu dla
czystych cieczy palnych [3]

Table 1.
Literature flash point data for pure flammable
liquids [3]

Ciecz palna Flammable liquid	Literaturowa wartość flash point [°C] Literature value of flash point [°C]
heptan	-4
1-butanol	36
2-butanol	20
alkohol metylowy	11
alkohol etylowy	11-12

Tabela 2.
Eksperymentalne wartości temperatury zapłonu
dla badanych mieszanin cieczy palnych

Table 2.
Experimental results on flash points for tested
liquid fuel blends

Mieszanina cieczy palnych Flammable liquid mixture	Doświadczalna wartość flash point [°C] Experimental value of flash point [°C]
1-butanol + metanol (50% / 50%)	20,1
2-butanol + etanol (50% / 50%)	15,3
heptan + 1-butanol (50% / 50%)	5,1
heptan + 2-butanol (50% / 50%)	3,8

3. Obliczenia numeryczne

3.1. Podstawy teoretyczne

W dalszej części artykułu opisano opracowany program obliczeniowy do szacowania temperatury zapłonu mieszanin dwuskładnikowych, oraz przybliżenie podstaw teoretycznych, na których opierają się obliczenia. Autorzy dokonali również analizy opisanych w tej części artykułu modeli numerycznych, co było przedmiotem wcześniejszej publikacji [6]. Niemniej jednak, ze względu na potrzebę zachowania układu logicznego tego artykułu, wspomniane wyżej modele zostaną tu ponownie przedstawione.

Równanie Le Chateliera dla mieszanin wyraża się poprzez zależność [3]:

$$1 = \sum \frac{y_i}{LFL_i} \quad (1)$$

gdzie, y_i – udział molowy składnika i w mieszaninie w fazie gazowej, LFL_i – dolna granica palności

dla czystego składnika i w powietrzu wyrażona jako udział molowy w mieszaninie z powietrzem.

Równanie Le Chateliera dla mieszaniny dwuskładnikowej przyjmie postać [7]:

$$1 = \frac{y_1}{LFL_1} + \frac{y_2}{LFL_2} \quad (2)$$

Dolne granice palności dla poszczególnych składników można wyrazić również jako stosunek prężności pary nasyconej składnika i w temperaturze zapłonu $P_{i,fp}^{sat}$ oraz ciśnienia otoczenia P [3, 8]:

$$LFL_i = \frac{P_{i,fp}^{sat}}{P} \quad (3)$$

Zakładając, że ciecz i jej pary są w stanie równowagi, wartość udziału molowego składnika i w fazie gazowej można obliczyć z równania równowagi para-ciecz (ang. *vapour-liquid equilibrium – VLE*) dla tej samej temperatury T i ciśnienia P [3]:

$$y_i \cdot \Phi_i \cdot P = x_i \cdot \gamma_i \cdot f_i \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (4)$$

gdzie, x_i – udział molowy składnika i w mieszaninie w fazie ciekłej, Φ_i – wskaźnik lotności, f_i – lotność składnika ciekłego, γ_i – współczynnik aktywności składnika i w fazie ciekłej.

Dla niskich ciśnień można założyć, że faza gazowa zachowuje się jak gaz doskonały, przez co wskaźnik lotności Φ_i może być zredukowany do jedności. Natomiast lotność składnika ciekłego f_i może być uproszczona do wartości ciśnienia nasycenia tego składnika P_i^{sat} [9]:

$$f_i \approx P_i^{sat} \quad (5)$$

Stosując powyższe założenia, równanie równowagowe para-ciecz przybierze postać:

$$y_i \cdot P = x_i \cdot \gamma_i \cdot P_i^{sat} \quad (6)$$

Przekształcając równanie (6) otrzymamy wzór na udział molowy składnika i w fazie gazowej:

$$y_i = \frac{x_i \cdot \gamma_i \cdot P_i^{sat}}{P} \quad (7)$$

Otrzymaną wartość y_i (7) oraz LFL_i (3) wstawiamy do równania Le Chateliera (1), otrzymując zależność dla mieszaniny dwuskładnikowej:

$$1 = \sum \frac{y_i}{LFL_i} = \frac{y_1}{LFL_1} + \frac{y_2}{LFL_2} = \frac{x_1 \cdot \gamma_1 \cdot P_1^{sat}}{P_{1,fp}^{sat}} + \frac{x_2 \cdot \gamma_2 \cdot P_2^{sat}}{P_{2,fp}^{sat}} \quad (8)$$

Zmiany ciśnienia nasycenia poszczególnych składników P_i^{sat} wraz z temperaturą może być oszacowane przez równanie Antoine'a [3, 10]:

$$\log P_i^{sat} = A_i - \frac{B_i}{T + C_i} \quad (9)$$

gdzie: A_p, B_p, C_p – stałe empiryczne, T – temperatura [K]

Innym, bardziej dokładnym modelem opisującym zmianę ciśnienia nasycenia danego składnika jest równanie Wagnera [3]:

$$\log P_i^{sat} = \frac{a\tau + b\tau^{1.5} + c\tau^3 + d\tau^6}{T_r} \quad (10)$$

gdzie: $\tau = 1 - T_r$, T_r – temperatura zredukowana równa

$T_r = \frac{T}{T_c}$, T_c – temperatura krytyczna, a, b, c, d – stałe empiryczne.

Powyższe równanie daje wyniki z dokładnością do 0,5% w stosunku do wyników badań eksperymentalnych dla $T_r \in (0,5; 1)$ [3].

Współczynnik aktywności γ_i może być szacowany przez różne równania [3]. Obecnie istnieją 4 główne modele (w nawiasach podano grupy substancji modelowane z największą dokładnością) [3]:

- równanie Margulesa,
- równanie Wilsona (alkohole, fenole, węglowodory alifatyczne),
- równanie NRTL (wodne roztwory organiczne),
- równanie UNIQUAC (węglowodory, ketony, estry, woda, aminy, alkohole).

Dla tzw. roztworów idealnych tzn. takich, które spełniają prawo Raoult'a w całym zakresie składu, od czystego składnika 1 do czystego składnika 2, wartości współczynników aktywności γ_i wynoszą 1, przez co równanie Le Chatelier zredukuje się do postaci [11]:

$$1 = \frac{x_1 \cdot P_1^{sat}}{P_{1,fp}^{sat}} + \frac{x_2 \cdot P_2^{sat}}{P_{2,fp}^{sat}} \quad (11)$$

co w połączeniu z równaniem Antoine'a (10) lub Wagnera (11) daje relatywnie prosty obliczeniowy model. White i in. [3] porównali powyższy model z danymi eksperymentalnymi uzyskanymi metodą Pensky-Martens zgodnie z normą PN-EN ISO 2719 [5]. Przebadane mieszaniny to mieszaniny paliw lotniczych JP-4/JP-8 oraz JP-8/JP-5.

Niestety nie wszystkie roztwory są idealne. Część z nich zachowuje się „prawie idealnie”, przez

co powyższy model może być stosowany w pewnym zakresie, a część wykazuje całkiem odmienne zachowanie w zależności od stężenia poszczególnych składników. Istnieją również roztwory, których temperatura zapłonu zmienia się w funkcji zawartości jednego składnika w ten sposób, że wykazuje ekstremum. Jeśli tym ekstremum jest maksimum, to taka mieszanina dla pewnego stężenia składników wykazuje wyższe wartości temperatury zapłonu niż dla poszczególnych składników. Ma to istotne znaczenie dla bezpieczeństwa użytkowania takich mieszanin, gdyż zmniejsza się niebezpieczeństwo zapłonu ich par. Jest to również metoda na zwiększenie bezpieczeństwa przechowywania określonych substancji, których temperatura zapłonu może być istotnie podwyższona poprzez dodanie innej substancji. Istnienie maksimum temperatury zapłonu mieszaniny oznacza, że mieszanina wykazuje tzw. ujemne odchylenie od roztworu idealnego ($\gamma_i < 1$), tzn. że ciśnienia cząstkowe par poszczególnych składników w mieszaninie są mniejsze niż przewiduje to prawo Raoult'a dla składników w czystej formie. Niższe ciśnienie cząstkowe skutkuje tym, że mieszanina musi być podgrzana do wyższej temperatury, żeby pary były w stanie stworzyć mieszaninę z powietrzem w stężeniu odpowiadającym dolnej granicy palności. Jeśli jednak tym ekstremum jest minimum, mamy wtedy do czynienia z mieszaniną, która jest mniej bezpieczna niż poszczególne jej składniki w formie czystej. Mieszaniny alkoholi i węglowodórów należą do takich mieszanin. Istnienie minimum temperatury zapłonu oznacza, że mieszanina wykazuje tzw. dodatnie odchylenie od roztworu idealnego ($\gamma_i > 1$), czyli ciśnienia cząstkowe par poszczególnych składników w mieszaninie są większe niż przewiduje to prawo Raoult'a dla składników w czystej formie. Przykładem jest tutaj mieszanina oktanu i etanolu, której temperatura zapłonu wynosi ok. 278 K dla stężeń objętościowych oktanu w mieszaninie będącej w zakresie (0,1–0,9), podczas gdy temperatura zapłonu dla czystego oktanu i etanolu wynosi odpowiednio 286 K i 288 K, więc rzeczywista temperatura zapłonu jest mniejsza o ok. 8 K, niż przewidywałoby to tzw. „podejście inżynierskie” opisane we wstępie niniejszej pracy.

3.2. Opis programu obliczeniowego

Program obliczeniowy stworzono przy pomocy arkusza kalkulacyjnego MS Excel. Wyboru tego dokonano ze względu na prostotę obsługi programu oraz jego powszechną dostępność. Nie bez znaczenia jest również możliwość rozbudowy programu i bazy danych. W celu wprowadzenia automatyzacji obliczeń wykorzystano funkcje napisane w języku skryptowym Visual Basic dostępnym z oprogramowaniem MS Excel. Program umożliwia prowadzenie obliczeń przy założeniu, że mieszanina jest ide-

alna lub nieidealna. W przypadku obliczeń prowadzonych przy założeniu, że mieszanina jest idealna, obliczenia programu opierają się na danych wejściowych dla czystych składników tzn.:

- 2 temperatury zapłonu czystych składników, T_{FP} [K],
- 3 współczynniki do równania Antoine'a A , B , C opisującego ciśnienie nasycenia par [Pa] cieczy w funkcji temperatury [K] poszczególnych składników.

Wartości temperatury zapłonu można znaleźć w kartach charakterystyk substancji lub w literaturze przedmiotu [3]. Program zawiera w sobie bazę danych powyższych parametrów dla wybranych substancji. Użytkownik może wybrać z nich odpowiednie składniki mieszaniny z listy rozwijalnej lub dodać własną substancję oraz zdefiniować jej właściwości. Zależność, jaką program rozwiązuje, to kombinacja równania Le Chateliera (1) i równań Antoine'a (9). Niewiadomą w równaniach jest temperatura zapłonu mieszaniny T_{FP} . Ze względu na złożoność równania nie może być ono rozwiązane jawnie. Najprostszym sposobem jest znalezienie temperatury zapłonu metodami iteracyjnymi, do czego wykorzystano język Visual Basic zawarty w programie Excel.

W przypadku obliczeń prowadzonych przy założeniu, że mieszanina nie jest idealna, program wymaga dodatkowo danych dotyczących współczynników aktywności poszczególnych składników, których wartości zależą od aktualnego składu mieszaniny. Uzyskanie ich może być kłopotliwe i wymaga znajomości dodatkowej ilości danych wejściowych. Na tym etapie rozwoju, program ma możliwości modelowania mieszanin nieidealnych w oparciu o model NRTL (Non Random Two Liquid) [3]. Model ten wymaga dodatkowo trzech współczynników zależnych od składników mieszaniny [12].

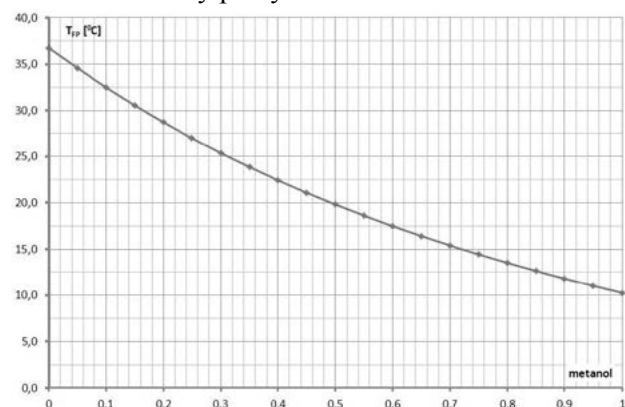
Program stanowi plik typu .xlsm tzn. standardowy plik w formacie MS Excell z włączoną obsługą makr (w języku Visual Basic). Arkusz kalkulacyjny zawiera 4 główne zakładki o nazwach:

- Obliczenia – w tej zakładce użytkownik wybiera składniki mieszaniny,
- Wykres T_{fp} K – zawiera wykres z wynikami T_{FP} w K w funkcji udziału objętościowego pierwszego składnika mieszaniny,
- Wykres T_{fp} C – zawiera wykres z wynikami T_{FP} w °C w funkcji udziału objętościowego pierwszego składnika mieszaniny,
- WM – zawiera dane dotyczące właściwości poszczególnych substancji.

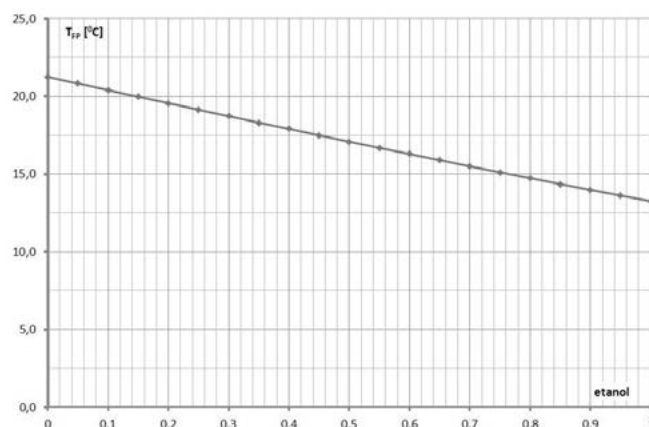
3.3. Wyniki obliczeń

Na rycinach od 2 do 5 znajdują się wyniki przeprowadzonych obliczeń numerycznych przy uży-

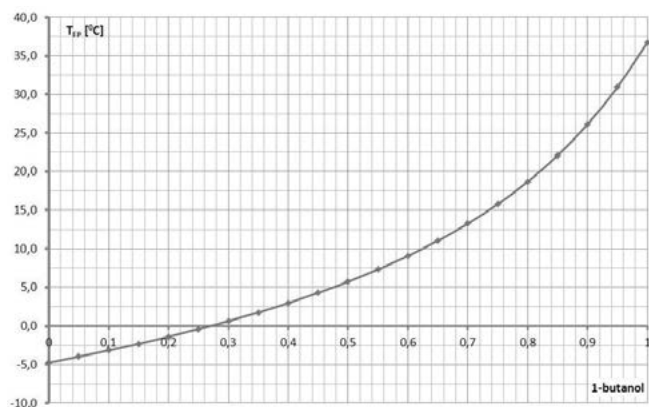
ciu modeli dla mieszanin idealnych w zakresie określenia wartości parametru flash point dla badanych mieszanin cieczy palnych.



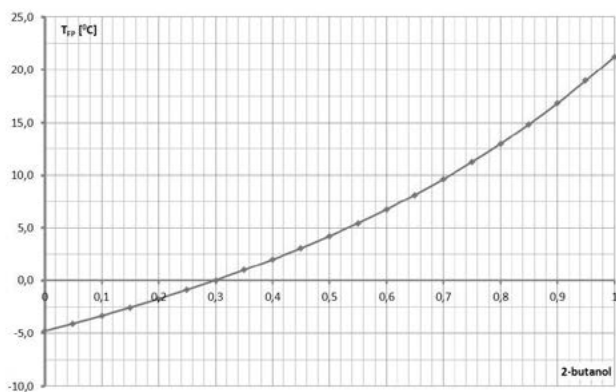
Ryc. 2. Wyniki obliczeń numerycznych w zakresie określenia temperatury zapłonu dla mieszaniny 1-butanolu z alkoholem metylowym (mieszanina idealna)
Fig. 2. Numerical results of flash point data for liquid fuel blends of 1-butanol and methanol (ideal mixture)



Ryc. 3. Wyniki obliczeń numerycznych w zakresie określenia wartości temperatury zapłonu dla mieszaniny 2-butanolu z alkoholem etylowym (mieszanina idealna)
Fig. 3. Numerical results of flash point data for liquid fuel blends of 2-butanol and ethanol (ideal mixture)



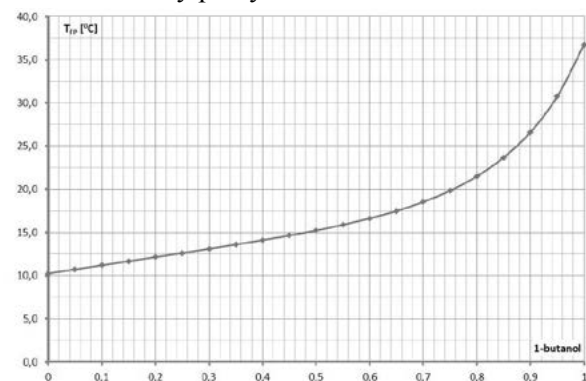
Ryc. 4. Wyniki obliczeń numerycznych w zakresie określenia wartości temperatury zapłonu dla mieszaniny 1-butanolu z heptanem (mieszanina idealna)
Fig. 4. Numerical results of flash point data for liquid fuel blends of 1-butanol and heptane (ideal mixture)



Ryc. 5. Wyniki obliczeń numerycznych w zakresie określenia wartości temperatury zapłonu dla mieszanki 2-butanolu z alkoholem metylowym (mieszanka idealna)

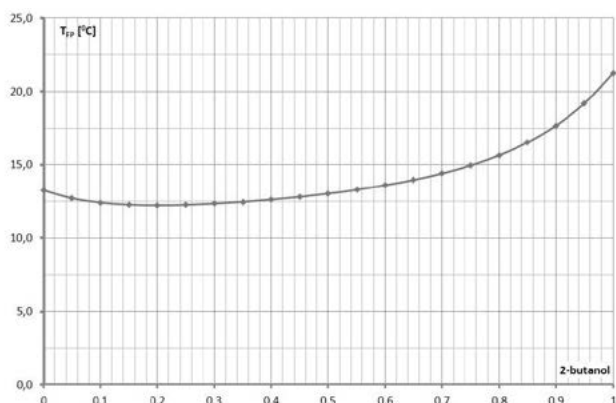
Fig. 5. Numerical results of flash point data for liquid fuel blends of 2-butanol and methanol (ideal mixture)

Na rycinach od 6 do 9 znajdują się wyniki przeprowadzonych obliczeń numerycznych przy użyciu modeli dla mieszanin nieidealnych w zakresie określenia wartości temperatury zapłonu dla badanych mieszanin cieczy palnych.



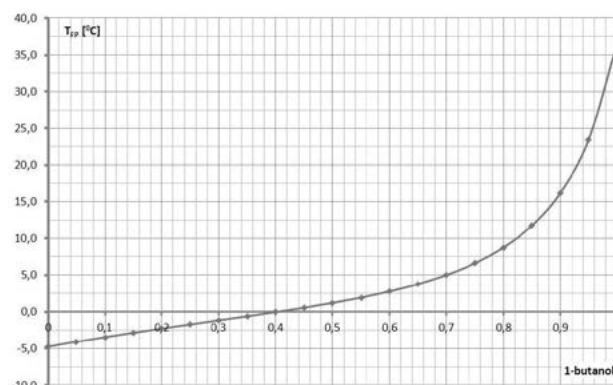
Ryc. 6. Wyniki obliczeń numerycznych w zakresie określenia wartości temperatury zapłonu dla mieszanki 1-butanolu z alkoholem metylowym (mieszanka nieidealna)

Fig. 6. Numerical results of flash point data for liquid fuel blends of 1-butanol and methanol (non-ideal mixture)



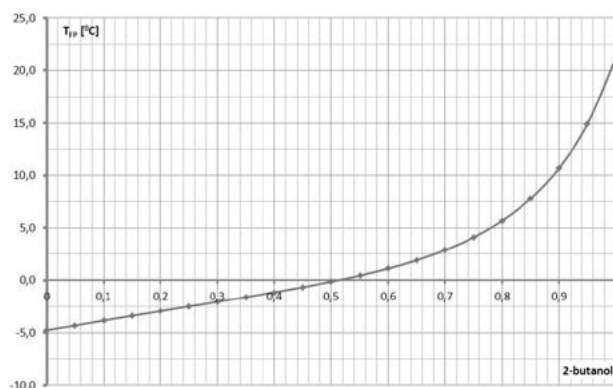
Ryc. 7. Wyniki obliczeń numerycznych w zakresie określenia wartości temperatury zapłonu dla mieszanki 2-butanolu z alkoholem etylowym (mieszanka nieidealna)

Fig. 7. Numerical results of flash point data for liquid fuel blends of 2-butanol and ethanol (non-ideal mixture)



Ryc. 8. Wyniki obliczeń numerycznych w zakresie określenia wartości temperatury zapłonu dla mieszanki 1-butanolu z heptanem (mieszanka nieidealna)

Fig. 8. Numerical results of flash point data for liquid fuel blends of 1-butanol and heptane (non-ideal mixture)



Ryc. 9. Wyniki obliczeń numerycznych w zakresie określenia wartości temperatury zapłonu dla mieszanki 2-butanolu z alkoholem metylowym (mieszanka nieidealna)

Fig. 9. Numerical results of flash point data for liquid fuel blends of 2-butanol and methanol (non-ideal mixture)

W Tabeli 3 przedstawiono zbiorcze zestawienie wartości temperatury zapłonu, uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych z podziałem na modele dla mieszanin idealnych oraz nieidealnych.

4. Wnioski

Przeprowadzone badania doświadczalne oraz obliczenia numeryczne w zakresie określenia temperatury zapłonu dla wybranych mieszanin cieczy palnych wskazują na fakt, że występują pewne różnice pomiędzy wynikami badań, a obliczeniami. Różnice te zawierają się w zakresie kilku °C, co należy uznać za akceptowalne. Obliczenia w zakresie parametru flash point przy użyciu modeli numerycznych dla mieszanin idealnych są jednak bardziej zbliżone do wyników badań doświadczalnych, co należy uznać za rekomendację do dalszych obliczeń oraz do wstępnego szacowania tego parametru w warunkach

Tabela 3.

Zestawienie eksperymentalnych i obliczeniowych temperatury zapłonu badanych mieszanin cieczy palnych dla składu 50% / 50%

Table 3.

Experimental and numerical results of flash point for tested fuel liquid blend (50% / 50%)

Mieszanina cieczy palnych Flammable liquid mixture	Doświadczalna temperatura zapłonu [°C] Experimental value of flash point [°C]	Obliczeniowa temperatura zapłonu (mieszanina idealna) [°C] Numerical value of flash point [°C]	Obliczeniowa temperatura zapłonu (mieszanina nieidealna) [°C] Numerical value of flash point [°C]
1-butanol + metanol (50% / 50%)	20,1	19,8	15,2
2-butanol+etanol (50% / 50%)	15,3	17	13,4
heptan + 1-butanol (50% / 50%)	5,1	5,7	1,2
heptan + 2-butanol (50% / 50%)	3,8	4,2	-0,1

przemysłowych, jeśli zaistnieje potrzeba mieszania dwóch nieznanymi dotąd cieczy palnych.

Literatura

1. Kletz T., *Learning from accidents*, Third edition, Gulf Professional Publishing, 2001.
2. Kletz T., *What went wrong – Case histories of process plant disasters*, Fourth edition, Gulf Professional Publishing, 1999.
3. Babrauskas V., *Ignition handbook*, Society of Fire Protection Engineers, 2003.
4. PKN-CEN/TR 15138, Produkty naftowe i inne ciecze. Przewodnik oznaczania temperatury zapłonu, PKN, 2009.
5. PN-EN ISO 2719, Oznaczanie temperatury zapłonu. Metoda zamkniętego tygla Pensky'ego-Martensa, PKN, 2007.
6. Rudy W., Porowski R., Teodorczyk A., *Metody określania temperatury zapłonu ciekłych substancji palnych i ich mieszanin*, „Archiwum Spalania”, 11(1-2), 2011.
7. Liaw H.-J., Lee Y.-H., Tang Ch.-L., Hsu H.-H., Liu J.-H., *A mathematical model for predicting the flash point of binary solutions*, „Journal of Loss Prevention in the Process Industries”, 15, 2002.
8. Liaw H.-J., Lin S.-Ch., *Binary mixtures exhibiting maximum flash-point behavior*, „Journal of Hazardous Materials”, 140, 2007.
9. Liaw H.-J., Lee T.-P., Tsai J.-S., Hsiao W.-H., Chen M.-H., Hsu T.-T., *Binary liquid solutions exhibiting minimum flash-point behavior*, „Journal of loss Prevention in the Process Industries”, 16, 2003.
10. Liaw H.-J., Tang Ch.-L., Lai J.-S., *A model for predicting the flash point of ternary flammable solutions of liquid*, „Combustion and Flame” 138, 2004.
11. Liaw H.-J., Chen Ch.-T., Cheng Ch.-Ch., Yang Y.-T., *Elimination of minimum flash-point behavior by addition of a specified third component*,

„Journal of Loss Prevention in the Process Industries”, 21, 2008, s. 82-100.

12. Kim S.Y., Lee B., *A prediction model for the flash point of binary liquid mixtures*, „Journal of Loss Prevention in the Process Industries”, 23, 2010.

Praca została sfinansowana w ramach projektu rozwojowego NCBiR nr NR10-0002-10/2010 pt. „Określenie parametrów flash point i explosion point dla wybranych paliw ciekłych oraz ich wpływu na bezpieczeństwo magazynowania i transportu tych paliw”.

dr inż. Rafał Porowski – absolwent Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. W latach 2008-2009 był uczestnikiem studiów podyplomowych z inżynierii bezpieczeństwa wodorowego w University of Ulster w Irlandii Północnej. W roku 2010 ukończył studia doktoranckie na Wydziale Mechanicznym, Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Temat rozprawy doktorskiej dotyczył badań doświadczalnych i symulacji numerycznych przejścia do detonacji w mieszaninach gazowych. W latach 2009–2010 w ramach stypendium Fulbrighta pracował w California Institute of Technology, gdzie w Explosion Dynamics Laboratory zajmował się badaniami doświadczalnymi propagacji fali uderzeniowych. Obecnie pełni funkcję kierownika Zespołu Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości w Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwpożarowej PIB w Józefowie.

mgr inż. Wojciech Rudy – absolwent Wydziału Mechanicznego, Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. W latach 2008-2009 był uczestnikiem studiów podyplomowych z inżynierii bezpieczeństwa wodorowego w University of Ulster w Irlandii Północnej. Obecnie jest doktorantem w Instytucie Techniki Ciepłej Wydziału MEiL Politechniki Warszawskiej. Tematyka badawcza związana ze spalaniem i wybuchowością mieszanin gazowych.

prof. dr hab. inż. Andrzej Teodorczyk – pracownik Instytutu Techniki Ciepłej Wydziału MEiL Politechniki Warszawskiej, uznany ekspert międzynarodowy w dziedzinie wybuchów i detonacji mieszanin gazowo-powietrznych oraz spalania paliw, prezes Polskiego Instytutu Spalania, członek międzynarodowego stowarzyszenia International Association for Hydrogen Safety oraz Institute for Dynamics of Explosions and Reactive Systems.