

Michał Wojciech Lewak<sup>a)\*</sup>, Jarosław Tępiński<sup>b)</sup>, Wojciech Kłapsa<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> *Warsaw University of Technology, Faculty of Chemical and Process Engineering / Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej*

<sup>b)</sup> *Scientific and Research Centre for Fire Protection – National Research Institute / Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej – Państwowy Instytut Badawczy*

\* *Corresponding author / Autor korespondencyjny: Michal.Lewak@pw.edu.pl*

## The Use of the k- $\omega$ SST Turbulence Model for Mathematical Modeling of Jet Fire

### Wykorzystanie modelu burzliwości k- $\omega$ SST do modelowania matematycznego pożaru strumieniowego

#### ABSTRACT

**Aim:** The purpose of this study is to verify the usability of the k- $\omega$  SST turbulence model for the description of the combustion process during a vertical propane jet fire. Simulating a jet fire using computational fluid mechanics involves an appropriate selection of a mathematical model to describe the turbulent flow. It is important as the variables from this model also describe the rate of the combustion reaction. As a result, they have an impact on the size and shape of the flame. The selection of an appropriate model should be preceded by preliminary simulations.

**Project and methods:** For this purpose, a vertical jet fire in no wind conditions was selected for simulation. Consequently, it was possible to develop a two-dimensional axisymmetric geometry. A good numerical mesh can be applied to such axisymmetric geometry. Selected process conditions allowed to create an axisymmetric numerical grid. Its values, proving the quality, are shown in a chart demonstrating the distribution of the parameter quality depending on the number of elements from which the numerical grid was built. In the work, a two-stage model of the combustion reaction was selected in order to verify whether the area in which the mole fraction of carbon monoxide will have significant values is so large that the selected kinetic reaction model will have an impact on the flame length.

**Results:** Three simulations of jet fire taking place in the direction opposite to the force of gravity were performed. The simulations performed allowed for setting the basic  $L_f$  parameter, which determines the flame length. Additionally, the length of the mixing path  $s_{lift-off}$ , needed to initiate the combustion reaction, was determined. The simulations performed allowed for comparing significant parameters characterizing the flame with the parameters calculated using correlations included in the literature on the subject. Due to this comparison, it was possible to define an interesting scope of research work, because the length of the gas mixing path determined from the CFD simulation differed significantly from the values calculated from the correlation.

**Conclusions:** Interestingly, such large differences between CFD results and correlations were not observed for the  $L_f$  parameter. The correlations based on the Froude number give slightly higher values of the flame length than the results of the CFD simulation. On the other hand, the correlation based on the Reynolds number gives slightly lower values of the  $L_f$  parameter than the values obtained from the CFD calculations. This may indicate that the effects related to the inertia forces ( $Re$  number) better describe the simulation process conditions than the correlations based on the influence of inertia forces and gravity forces ( $Fr$  number).

**Keywords:** jet fire, mathematical modelling, computational fluid dynamics

**Type of article:** short scientific report

---

Received: 07.03.2022; Reviewed: 24.03.2022; Accepted: 29.03.2022;

Authors' ORCID IDs: M.W. Lewak – 0000-0001-9012-8347; J. Tępiński – 0000-0002-5005-2795; W. Kłapsa – 0000-0002-6481-587X;

Percentage contribution: M.W. Lewak – 70%; J. Tępiński – 15%; W. Kłapsa – 15%;

Please cite as: SFT Vol. 59 Issue 1, 2022, pp. 28–40, <https://doi.org/10.12845/sft.59.1.2022.1>;

This is an open access article under the CC BY-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

---

#### ABSTRAKT

**Cel:** Celem tego opracowania jest sprawdzenie przydatności modelu k- $\omega$  SST do opisu procesu spalania podczas pionowego pożaru strumieniowego propanu. Symulacja pożaru strumieniowego przy pomocy obliczeniowej mechaniki płynów wiąże się z odpowiednim wyborem modelu matematycznego służącego do opisu przepływu burzliwego. Jest to o tyle ważne, że zmienne z tego modelu opisują również szybkość reakcji spalania, a więc mają wpływ na rozmiar i kształt płomienia. Dobór odpowiedniego modelu powinien być poprzedzony symulacjami wstępnymi.

**Projekt i metody:** Do symulacji wybrano pionowy pożar strumieniowy w warunkach bezwietrznych. Dzięki temu opracowana została dwuwymiarowa osiowoosymetryczna geometria, na którą możliwe jest nałożenie dobrej siatki numerycznej. Wybrane warunki procesowe pozwoliły na stworzenie

osiowosymetrycznej siatki numerycznej, której wartości świadczące o jakości uwidocznił na wykresie przedstawiającym rozkład jakości parametru w zależności od liczby elementów, z jakich zbudowano siatkę numeryczną. Na podstawie dwuetapowego modelu reakcji spalania sprawdzono, czy obszar, w którym ułamek molowy tlenu węgla będzie miał duże wartości wpłynie na długość płomienia w wybranym modelu kinetycznym reakcji.

**Wyniki:** Wykonane zostały trzy symulacje pożaru strumieniowego odbywającego się w kierunku przeciwnym do działania sił grawitacji. Pozwoliły one na wyznaczenie podstawowego parametru  $L_f$ , który określa długość płomienia. Dodatkowo wyznaczona została długość drogi mieszania  $S_{mix-off}$ , która jest niezbędna do zapoczątkowania reakcji spalania. Wykonane symulacje pozwoliły na porównanie istotnych parametrów charakteryzujących płomień z parametrami obliczonymi przy pomocy korelacji zawartych w literaturze przedmiotu.

**Wnioski:** Porównanie wyżej wymienionych parametrów umożliwiło określenie ciekawego zakresu pracy badawczej, ponieważ wyznaczona z symulacji CFD długość drogi mieszania gazu znacząco różniła się od wartości obliczonych z korelacji. Co ciekawe, tak dużych rozbieżności między wynikami CFD a korelacjami nie zaobserwowano dla parametru  $L_f$ . Przy czym korelacje oparte o liczbę Froude'a podają nieco większe wartości długości płomienia niż wyniki symulacji CFD. Natomiast korelacja oparta o liczbę Reynoldsa podaje nieco mniejsze wartości parametru  $L_f$  niż wartości otrzymane z obliczeń CFD. Może to świadczyć o tym, że efekty związane z siłami bezwładności (liczba  $Re$ ) lepiej opisują warunki procesowe niż korelacje oparte o wpływ sił bezwładności i sił ciężkości (liczba  $Fr$ ).

**Słowa kluczowe:** pożar strumieniowy, modelowanie matematyczne, obliczeniowa mechanika płynów

**Typ artykułu:** doniesienie wstępne

**Przyjęty:** 07.03.2022; **Zrecenzowany:** 24.03.2022; **Zaakceptowany:** 29.03.2022;

Identyfikatory ORCID autorów: M.W. Lewak – 0000-0001-9012-8347; J. Tępiński – 0000-0002-5005-2795; W. Kłapsa – 0000-0002-6481-587X;

Procentowy wkład merytoryczny: M.W. Lewak – 70%; J. Tępiński – 15%; W. Kłapsa – 15%;

**Proszę cytować:** SFT Vol. 59 Issue 1, 2022, pp. 28–40, <https://doi.org/10.12845/sft.59.1.2022.1>;

Artykuł udostępniany na licencji CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

## Introduction

This work focuses on the phenomenon of jet fire taking place in the vertical direction in relation to the action of gravity. In this type of fires in windless conditions, the main direction of the flame coincides with the direction of the gas outlet from the nozzle. There are two methods of determining flame length and width in jet fires. The first is to conduct experimental tests of an actual fire on a laboratory or semi-technical scale. This method uses thermal imaging cameras as well as Palacios [6–7] and Kalghatgi [2] temperature and pressure sensors. The second method is based on numerical simulations of the combustion process using the computational fluid mechanics of CFD. Experimental tests have their limitations. Therefore, only due to numerical simulations, it is possible to predict the flame length wherever the scale of the fire does not allow for test experiments. However, the mathematical models used in CFD techniques should be tested on the basis of the results of Cumber experimental research [1]. This results in basing the CFD methods partly on the experimental results. Quite an interesting trend applied in the publication of Mashhadimoslem [5] was connected with the use of artificial neural networks to predict parameters describing the length and width of the flame. For this purpose, experimental research is used to create an artificial neural network, which is then used to determine the parameters describing the shape of the flame. Mathematical modelling of jet fire using CFD methods is based on the use of the mathematical model of the combustion process in a developed turbulent flow given by Magnussen [3]. The model uses process parameters to describe turbulent flow. Typically, one of the two  $k-\epsilon$  or  $k-\omega$  turbulence models is used. Both of these mathematical models allow for the correct description of the jet fire phenomenon, as shown by the verifications

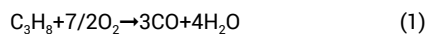
## Wprowadzenie

W artykule skupiono się na zjawisku pożaru strumieniowego odbywającego się w kierunku pionowym w stosunku do działania sił ciężkości. W tego typu pożarach prowadzonych w warunkach bezwietrznych, główny kierunek płomienia pokrywa się z kierunkiem wylotu gazu z dyszy. Istnieją dwie metody wyznaczenia długości i szerokości płomienia podczas pożarów strumieniowych. Pierwsza polega na przeprowadzeniu badań doświadczalnych rzeczywistego pożaru w skali laboratoryjnej lub półtechnicznej. W tej metodzie wykorzystuje się kamery termowizyjne oraz czujniki temperatury i ciśnienia opisane przez Palacios [6–7], Kalghatgiego [2] i Zhanga [12]. Druga metoda polega na symulacjach numerycznych procesu spalania, wykorzystując do tego obliczeniową mechanikę płynów CFD. Badania doświadczalne mają swoje ograniczenia, dlatego symulacje numeryczne pozwalają na przewidywanie długości płomienia wszędzie tam, gdzie skala pożaru uniemożliwia doświadczenia testowe. Jednakże wykorzystywane modele matematyczne w technikach CFD powinny być testowane w oparciu o wyniki badań doświadczalnych Cumber [1]. To sprawia, że metody CFD częściowo bazują na wynikach doświadczalnych. Dość ciekawym trendem zastosowanym w publikacji Mashhadimoslema [5] jest użycie sztucznych sieci neuronowych do przewidywania parametrów opisujących długość i szerokość płomienia. W tym celu wykorzystuje się badania doświadczalne do stworzenia sztucznej sieci neuronowej, która później służy do wyznaczania parametrów opisujących kształt płomienia. Modelowanie matematyczne pożaru strumieniowego przy użyciu metod CFD opiera się na zastosowaniu modelu matematycznego procesu spalania w rozwiniętym przepływie burzliwym podanym przez Magnussena [3]. Model wykorzystuje parametry procesowe służące do opisu przepływu burzliwego. Zazwyczaj

made by Mashhadimoslem [4]. Additionally, they are numerically less demanding than the three- and four-dimensional Transitions k-kl- $\omega$  models and the Transition SST model. Due to the fact that the jet fire is characterized by very high values of Reynolds numbers in the place where the gas leaves the tank, the k- $\epsilon$  models perform well there. Unfortunately, at a distance from the flame, the values of Reynolds numbers can be much smaller and there the model may fail. Moreover, in the boundary layer, this model does not do well enough to describe turbulent flow. The advantage of the k- $\epsilon$  model is its low sensitivity to inlet conditions. On the other hand, the k- $\omega$  model performs well in the boundary layer and where the values of Reynolds numbers are not too high, which takes place at a distance from the flame. Nevertheless, the fact that the k- $\omega$  model is very sensitive to inlet conditions means that it does not describe the shape of the flame correctly in the case when the quantities describing turbulent flow at the inlet to the system are not known. All these features resulted in the development of the k- $\omega$  SST model, a model that combines the advantages of the two previously mentioned. In the k- $\omega$  SST model, both models were combined and the function limiting the value of shear stresses in the main flow was used. This allowed for getting rid of the limitations of the k- $\omega$  model while simultaneously using the advantages of the k- $\epsilon$  model.

## Mathematical description of jet fire

Pure propane gas was selected to simulate the jet fire. The propane combustion reactions were described by means of a two-step reaction:



The transport of momentum, heat and mass in the considered process can be described by the following differential equations:

1. Continuity equation:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

2. RANS equations for turbulent flow:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu_m + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (4)$$

Mathematical model of k- $\omega$  SST turbulence:

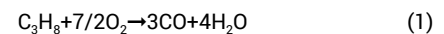
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \hat{G}_k - \beta^* \rho \omega k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + 2\rho(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \frac{\gamma}{\nu} \hat{G}_k - \beta \rho \omega^2 \quad (6)$$

używa się jednego z dwóch modeli burzliwości: k- $\epsilon$  lub k- $\omega$ . Oba modele matematyczne pozwalają na poprawny opis zjawiska pożaru strumieniowego, co pokazały weryfikacje wykonane przez Mashhadimoslema [4]. Dodatkowo są mniej wymagające numerycznie niż modele trzy i czterowymiarowe modele turbulencji k-kl- $\omega$  i model turbulencji SST. Ponieważ pożar strumieniowy cechują bardzo wysokie wartości liczb Reynoldsa, dlatego w miejscu, gdzie gaz wydostaje się ze zbiornika dobrze sobie radzą modele k- $\epsilon$ . Niestety w pewnej odległości od płomienia wartości liczb Reynoldsa mogą być dużo mniejsze i tam model ten może zawodzić. Ponadto w warstwie przyściennej model ten nie radzi sobie najlepiej z opisem przepływu burzliwego. Zaletą modelu k- $\epsilon$  jest jego mała wrażliwość na warunki wlotowe. Z drugiej strony model k- $\omega$  świetnie sobie radzi w warstwie przyściennej i tam, gdzie wartości liczb Reynoldsa nie są zbyt wysokie, co ma miejsce w pewnej odległości od płomienia. Model k- $\omega$  jest za to bardzo wrażliwy na warunki wlotowe, przez co niepoprawnie opisuje kształt płomienia w przypadku, gdy nieznanne są wielkości opisujące przepływ burzliwy na wlocie do układu. Te wszystkie cechy sprawiły, że opracowany został model k- $\omega$  SST, który łączy zalety obu wcześniej wspomnianych. Połączono w nim oba modele i zastosowano funkcję limitującą wartość naprężeń ścinających w głównym przepływie. Pozwoliło to na wyeliminowanie ograniczeń modelu k- $\omega$  i jednocześnie wykorzystanie zalet modelu k- $\epsilon$ .

## Opis matematyczny pożaru strumieniowego

Do symulacji pożaru strumieniowego wybrano czysty propan w fazie gazowej. Reakcje jego spalania opisano przy pomocy dwuetapowej reakcji:



Transport pędu, ciepła i masy w rozpatrywanym procesie może być opisany następującymi równaniami różniczkowymi:

1. Równanie ciągłości:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

2. Równania RANS dla przepływu burzliwego:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu_m + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (4)$$

Model matematyczny turbulencji k- $\omega$  SST:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \hat{G}_k - \beta^* \rho \omega k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + 2\rho(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \frac{\gamma}{\nu} \hat{G}_k - \beta \rho \omega^2 \quad (6)$$

The  $\widehat{G}_k$  function and other expressions in the model are expressed by the equations:

$$\widehat{G}_k = \min(\mu_T S^2, 10\rho\beta^*k\omega) \quad (7)$$

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \sigma_{\omega 1} k^2 / \sqrt{\beta^*} \quad (8)$$

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \sigma_{\omega 2} k^2 / \sqrt{\beta^*} \quad (9)$$

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (10)$$

$$\mu_t = \rho v_t \quad (11)$$

$$S = \sqrt{2S_{ii}S_{ii}} \quad (12)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

Funkcja  $\widehat{G}_k$  i pozostałe wyrażenia w modelu wyrażone są równaniami:

$$\widehat{G}_k = \min(\mu_T S^2, 10\rho\beta^*k\omega) \quad (7)$$

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \sigma_{\omega 1} k^2 / \sqrt{\beta^*} \quad (8)$$

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \sigma_{\omega 2} k^2 / \sqrt{\beta^*} \quad (9)$$

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (10)$$

$$\mu_t = \rho v_t \quad (11)$$

$$S = \sqrt{2S_{ii}S_{ii}} \quad (12)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

The constants in the k- $\omega$  SST model are mentioned in the table below.

Stałe w modelu k- $\omega$  SST zostały zapisane w poniższej tabeli.

**Table 1.** Value of parameters in the k- $\omega$  SST model

**Tabela 1.** Wartość parametrów w modelu k- $\omega$  SST

	$\sigma k$	$\sigma \omega$	$\beta$	$\beta^*$	$\kappa$
1	0.85	0.5	0.075	0.09	0.41
2	1.00	0.856	0.09	0.09	0.41

**Source:** Own elaboration.

**Źródło:** Opracowanie własne.

Balance equations for k-th component:

$$\rho \frac{\partial \varphi_k}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (\varphi_k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( (\rho D_{km} + \frac{\mu_t}{Sc_t}) \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_i} \right) + R_k \quad (14)$$

Równania bilansu k-tego składnika:

$$\rho \frac{\partial \varphi_k}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (\varphi_k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( (\rho D_{km} + \frac{\mu_t}{Sc_t}) \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_i} \right) + R_k \quad (14)$$

The turbulent Schmidt number is expressed by the relationship:

$$Sc_t = 0,7 \quad (15)$$

In the equation (14) the reaction term  $R_k$  describing the course of the reaction in turbulent flow is described by the relationship given by Magnussen and Hjertager [3].

Turbulentna liczba Schmidta wynosi:

$$Sc_t = 0,7 \quad (15)$$

Człon reakcyjny  $R_k$  w równaniu (14) opisującym przebieg reakcji w przepływie burzliwym opisany został zależnością podaną przez Magnussena i Hjertagera [3].

Energy balance:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (H) + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (H u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_k + S_{rad} \quad (16)$$

Bilans energii:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (H) + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (H u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_k + S_{rad} \quad (16)$$

The value of the effective thermal conductivity coefficient  $\lambda_{eff}$  is expressed by the relationship:

$$\lambda_{eff} = \lambda_m + \frac{\mu_t C_{p,m}}{Pr_t} \quad (17)$$

Wartość efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda_{eff}$  wyrażona jest zależnością:

$$\lambda_{eff} = \lambda_m + \frac{\mu_t C_{p,m}}{Pr_t} \quad (17)$$

The enthalpy of the mixture is calculated by the formula:

$$H = \sum_{k=1}^N \varphi_k h_k \quad (18)$$

Entalpia mieszaniny obliczana jest za pomocą wzoru:

$$H = \sum_{k=1}^N \varphi_k h_k \quad (18)$$

where  $N$  is the total number of the components in the gas mixture.

gdzie  $N$  określa całkowitą liczbę składników w mieszaninie gazowej.

The Discrete Ordinates (DO) mathematical model was chosen to describe energy transport by radiation. This model allows for the description of radiation in the system. However, numerically it is a very expensive model, i.e. it requires suitably good computing servers. Applying this model for CFD calculations almost doubles the time needed to obtain a numerical solution than in the case of simpler radiation models. This model is described in detail in [13].

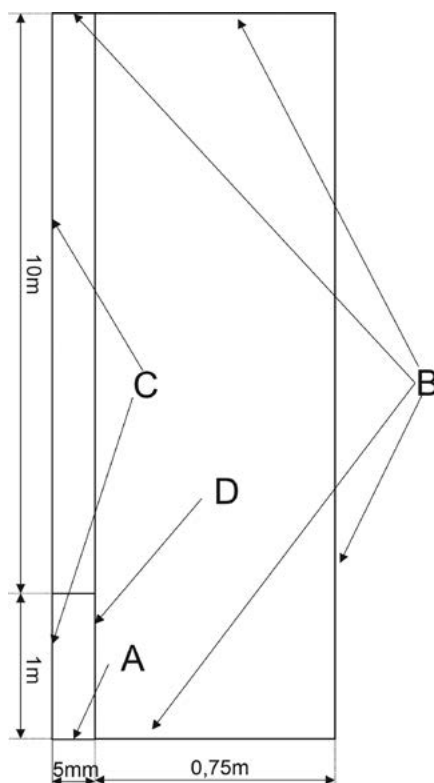
## Geometric model of the simulated problem

The case of a vertical jet fire taking place in windless conditions was selected for the simulation. Therefore, the considered problem can be simplified to the case of a two-dimensional axisymmetric space. Figure 1 shows the geometric diagram of the area. In this area, the gas escapes from a vertical nozzle with a diameter  $d_{nozzle} = 0.01$  m and length  $L = 1$  m into a space where it is in contact with air. In order to determine the height and width of the flame, correlations provided by Palacios [7] were used. These sizes were used to estimate the size of the area needed for the correct simulation of the process.

Do opisu transportu energii za pomocą promieniowania wybrany został model matematyczny (ang. *Discrete Ordinates*, DO). Pozwala on na opis radiacji w układzie, jest jednak modelem bardzo kosztownym numerycznie tzn. wymaga odpowiednio dobrych serwerów obliczeniowych. Wykorzystanie go do obliczeń CFD powoduje prawie dwukrotne zwiększenie czasu potrzebnego na uzyskanie rozwiązania numerycznego niż w przypadku prostszych modeli radiacji. Model ten szczegółowo opisano w pracy [13].

## Model geometryczny symulowanego problemu

Do symulacji wybrano przypadek pionowego pożaru strumieniowego odbywającego się w warunkach bez udziału wiatru. W związku z tym rozpatrywany problem może zostać uproszczony do przypadku dwuwymiarowej przestrzeni osiowoosymetrycznej. Na rycinie 1 przedstawiono schemat geometryczny obszaru. W obszarze tym z pionowej dyszy o średnicy  $d_{nozzle} = 0,01$  m i długości  $L = 1$  m gaz wydostaje się do przestrzeni, gdzie kontaktuje się z powietrzem. Do określenia wysokości i szerokości płomienia użyto korelacji podanych przez Palacios [7]. Wielkości te posłużyły do oszacowania rozmiaru obszaru potrzebnego do oszacowania poprawnej symulacji procesu.



**Figure 1.** Geometric diagram of the problem  
**Rycina 1.** Schemat geometryczny problemu

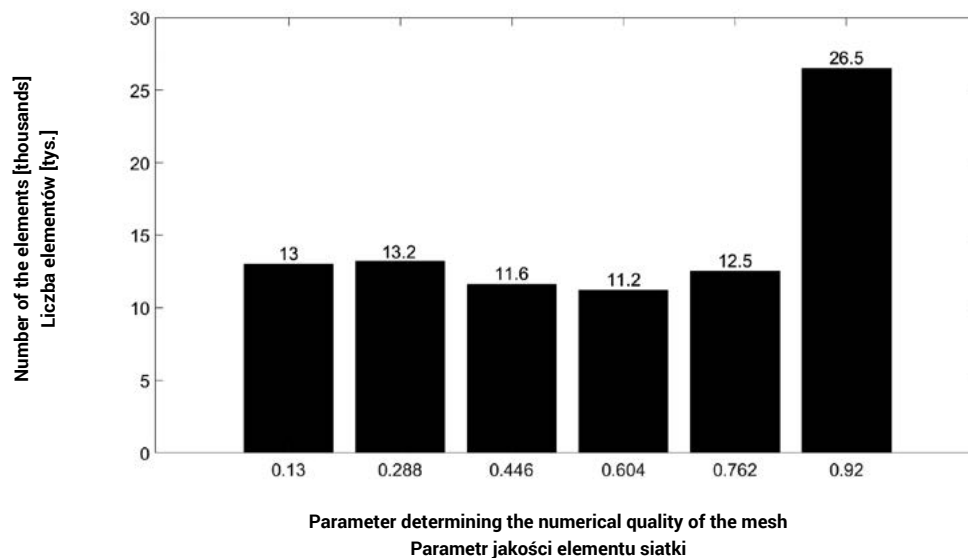
Source: Own elaboration.  
Źródło: Opracowanie własne.

The following boundary conditions were selected for numerical simulations: A – velocity inlet, B – pressure outlet, C – axis, D – wall.

Do symulacji numerycznych wybrano warunki brzegowe: A – wlot prędkości (ang. *velocity inlet*), B – wylot ciśnienia (ang. *pressure outlet*), C – oś (ang. *axis*), D – ściana (ang. *wall*).

A numerical grid consisting of 88.000 rectangular elements has been developed. The parameter indicating the orthogonal quality in all elements was 1. Figure 2 shows the values of the parameter describing the numerical quality of the mesh depending on the number of the elements.

Opracowano siatkę numeryczną składającą się z 88 000 prostokątnych elementów. Parametr oznaczający jakość ortogonalną (ang. *orthogonal quality*) we wszystkich elementach wynosił 1. Na rycinie 2 przedstawiono wartości parametru określającego jakość numeryczną siatki w zależności od liczby elementów.



**Figure 2.** Distribution of the parameter that determines the numerical quality of the mesh  
**Rycina 2.** Rozkład parametru określającego jakość numeryczną siatki

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

## The results of numerical simulations

Three jet fire simulations were performed depending on the velocity of the gas leaving the nozzle. It was assumed that the gas leaving the nozzle was under the pressure of 101325 [Pa] and its temperature was 300 [K]. The same temperature and pressure conditions existed at the edges, which limited the calculation area. It was assumed that the gas behaves like an ideal gas, which made it possible to determine the density of the gas leaving the nozzle from the ideal gas equation. The conditions at the gas inlet to the area needed to calculate the turbulence model were based on the turbulence intensity and the hydraulic diameter of the nozzle ( $dh = 0.01$  [m]). The correlations needed to estimate the intensity of turbulence  $I$  were taken from the work of Russo [9].

$$I = \frac{0.16}{Re^{0.125}} \quad (19)$$

Reynolds and Froude numbers can be described by the relationships:

$$Re = \frac{u_{in} \cdot \rho \cdot d_{nozzle}}{\mu} \quad (20)$$

$$Fr_{in} = \frac{u_{in}^2}{g \cdot d_{nozzle}} \quad (21)$$

## Wyniki symulacji numerycznych

Wykonano trzy symulacje pożaru strumieniowego w zależności od prędkości gazu opuszczającego dyszę. Przyjęto, że gaz opuszczający dyszę jest pod ciśnieniem 101325 [Pa] a jego temperatura wynosi 300 [K]. Te same warunki temperatury i ciśnienia panowały na brzegach, który ograniczał obszar obliczeniowy. Założono, że gaz zachowuje się jak gaz doskonały, co pozwoliło na wyznaczenie gęstości gazu opuszczającego dyszę z równania stanu gazu doskonałego. Warunki na wlocie gazu do obszaru potrzebne do obliczenia modelu burzliwości zostały oparte o intensywność turbulencji oraz średnicę hydrauliczną dyszy ( $dh = 0.01$  [m]). Korelację potrzebną do oszacowania intensywności turbulencji  $I$  zaczerpnięto z pracy Russo [9].

$$I = \frac{0.16}{Re^{0.125}} \quad (19)$$

Liczbę Reynoldsa i liczbę Froude'a można wyrazić zależnościami:

$$Re = \frac{u_{in} \cdot \rho \cdot d_{nozzle}}{\mu} \quad (20)$$

$$Fr_{in} = \frac{u_{in}^2}{g \cdot d_{nozzle}} \quad (21)$$

The physicochemical parameters of all the ingredients were taken from the Fluent database. The exception was the dynamic viscosity of propane, the values of which were approximated by the Sutherland equation using the data included in [11].

Table 2 shows the velocity  $u_{in}$ , Reynolds  $Re_m$  number and Froude  $Fr_m$  number at the fuel inlet to the area.

Parametry fizykochemiczne wszystkich składników zostały zaczerpnięte z bazy programu Fluent. Wyjątek stanowiły wartości lepkości dynamicznej propanu, które aproksymowano równaniem Sutherland'a, korzystając z danych zamieszczonych w pracy [11].

W tabeli 2 zamieszczono wartości prędkości  $u_{in}$ , liczby Reynoldsa  $Re_m$  i liczby Froude'a  $Fr_m$  na wlocie paliwa do obszaru.

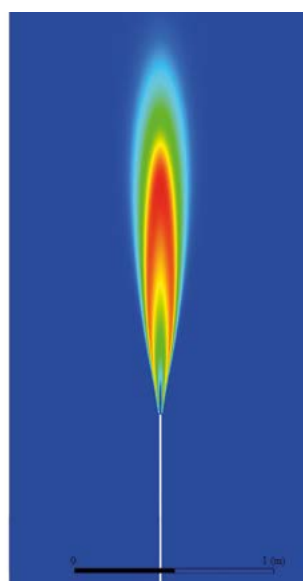
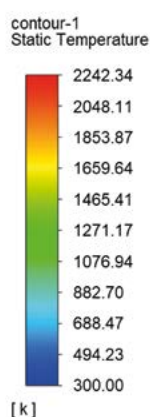
**Table 2.** Propane process parameters at the nozzle outlet  
**Tabela 2.** Parametry procesowe propanu na wylocie z dyszy

Name / Nazwa	$u_{in}$ [m/s]	$Re_m$ [-]	$Fr_m$ [-]
Jet1	20	43720	4077
Jet2	40	87430	16310
Jet3	60	131150	36697

Source: Own elaboration.  
Źródło: Opracowanie własne.

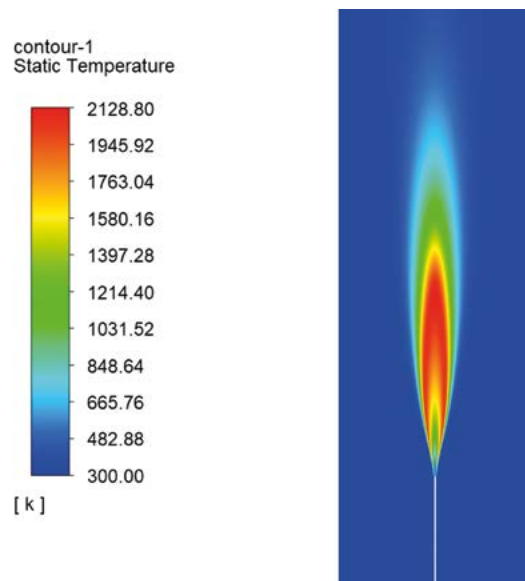
Figure 3 and 4 show the temperature distribution in the cross-section of the flame. The values of the maximum temperatures in the simulations did not exceed the value of the adiabatic flame temperature, which for propane is  $T_{flamead} = 2253.15$  [K]. The shape of the flame resembles the elliptical shape known from the experiments. Increasing gas velocity at the inlet causes a decrease in the maximum temperature in the flame, which is in line with the experiment. The increase in temperature increases the propane mass flow, resulting in an increase in heat generated by combustion. However, the length and width of the flame also increase, which increases the heat capacity of the gas. The increased heat capacity of the gas has the effect of reducing the maximum flame temperature.

Na rycinach 3 i 4 pokazany został rozkład temperatur w przekroju płomienia. Wartości maksymalnych temperatur w symulacjach nie przekroczyły wartości adiabatycznej temperatury płomienia, która dla propanu wynosi  $T_{flamead} = 2253,15$  [K]. Kształt płomienia przypomina znany z doświadczeń eliptyczny kształt. Wzrost prędkości gazu na wlocie powoduje spadek maksymalnej temperatury w płomieniu, co jest zgodne z doświadczeniem. Wzrost temperatury powoduje wzrost strumienia masowego propanu, co prowadzi do zwiększenia ciepła generowanego w wyniku spalania. Jednakże rośnie też długość i szerokość płomienia, co zwiększa pojemność cieplną gazu. Zwiększona pojemność cieplna gazu ma wpływ na spadek maksymalnej temperatury płomienia.



**Figure 3.** Distribution of temperatures in the cross-section of the flame-jet1  
**Rycina 3.** Rozkład temperatur w przekroju płomienia-jet1

Source: Own elaboration.  
Źródło: Opracowanie własne.

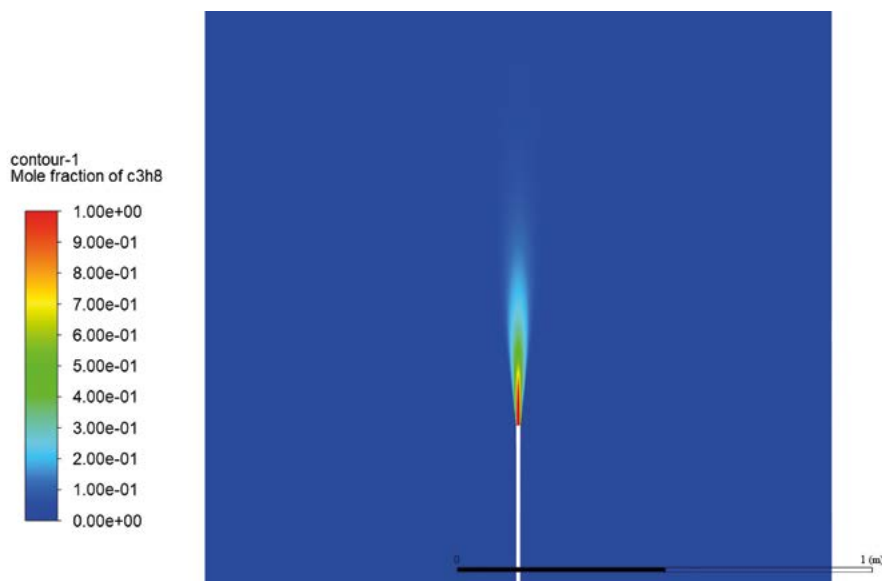


**Figure 4.** Distribution of temperatures in the cross-section of the flame-jet2  
**Rycina 4.** Rozkład temperatur w przekroju płomienia-jet2

Source: Own elaboration.  
 Źródło: Opracowanie własne.

The distribution of the mole fraction in the flame cross-section allows for the determination of the  $s_{lift-off}$  parameter, which determines the length of the gas mixing path before the propane oxidation process takes place. To determine the  $s_{lift-off}$  there is an area in which the mole fraction of the fuel is greater than or equal to 0.99. Then, one determines the maximum value of the distance from the outlet in which this inequality is satisfied. For jet fires, it is the height ( $y$ -coordinate). It is shown in red in Figure 4.

Rozkład ułamka molowego w przekroju płomienia pozwala na określenie parametru  $s_{lift-off}$ , który określa długość drogi mieszania gazu, zanim nastąpi proces utleniania propanu. Do wyznaczenia  $s_{lift-off}$  znajduje się obszar, w którym ułamek molowy paliwa jest większy lub równy 0,99, a następnie wyznacza się maksymalną wartość odległości od wylotu, w której ta nierówność jest spełniona. W przypadku pożarów strumieniowych jest to wysokość (współrzędna  $y$ ), na rycinie 4 uwidoczniiona kolorem czerwonym.



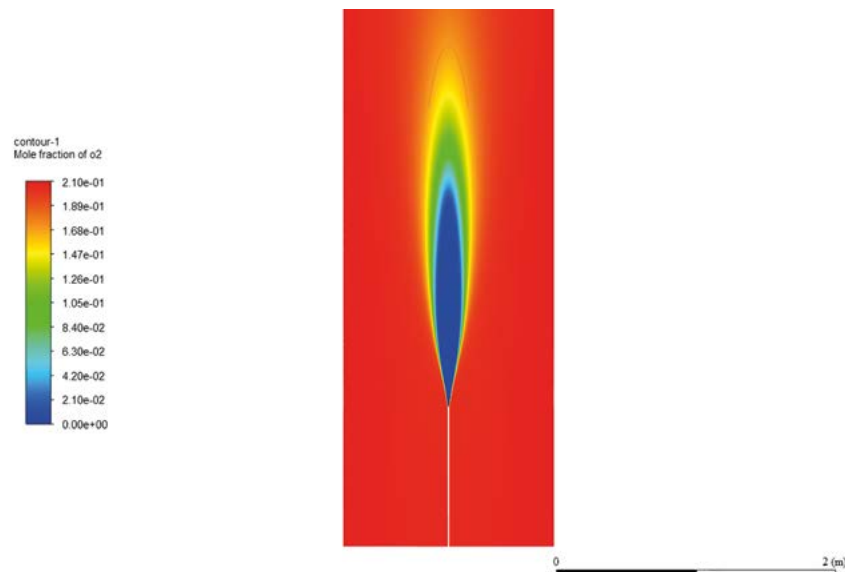
**Figure 5.** Distribution of the mole fraction of propane  $y_{c3h8}$  in the cross section of the flame-jet2  
**Rycina 5.** Rozkład ułamka molowego propanu  $y_{c3h8}$  w przekroju płomienia-jet2

Source: Own elaboration.  
 Źródło: Opracowanie własne.



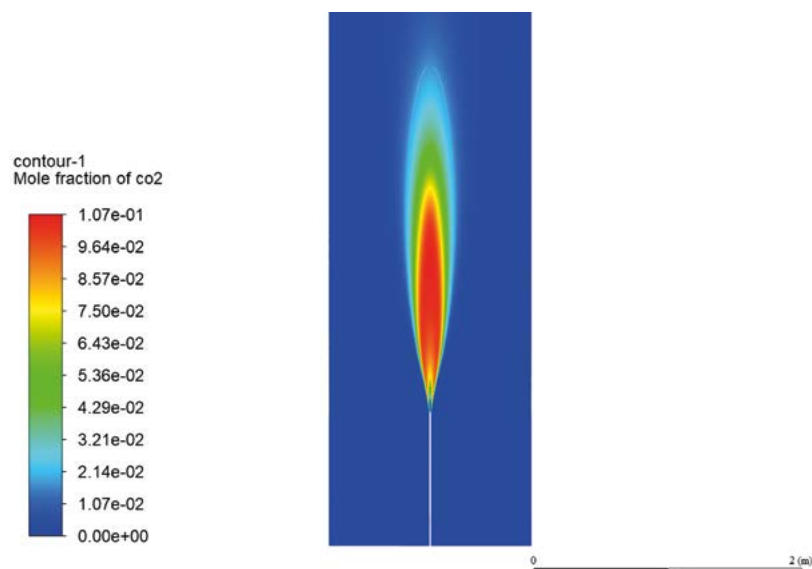
The following figures show (see Figure 6–8) the distributions of the mole fractions of oxygen, carbon dioxide and carbon monoxide in the jet2 simulation. As it can be seen from these figures, the model of the two-stage reaction of propane combustion is justified because the zone in which carbon monoxide occurs is quite large (see Figure 8). Despite the large Reynolds  $Re$  (see Table 2) numbers of propane at the inlet to the system, turbulent vortices have some noticeable effect on the reaction of incomplete combustion of propane.

Na kolejnych rycinach przedstawiono rozkłady ułamków molowych tlenu, dwutlenku węgla i tlenku węgla w symulacji jet2 (zob. ryc. 6–8). Na podstawie tych rycin można stwierdzić, że model dwuetapowej reakcji spalania propanu ma uzasadnienie, ponieważ strefa, w której występuje tlenek węgla, jest dość spora (zob. ryc. 8). Pomimo dużych liczb Reynoldsa propanu na wlocie do układu  $Re$  (zob. tabela 2), wiry burzliwe mają pewien zauważalny wpływ na reakcje niepełnego spalania propanu.



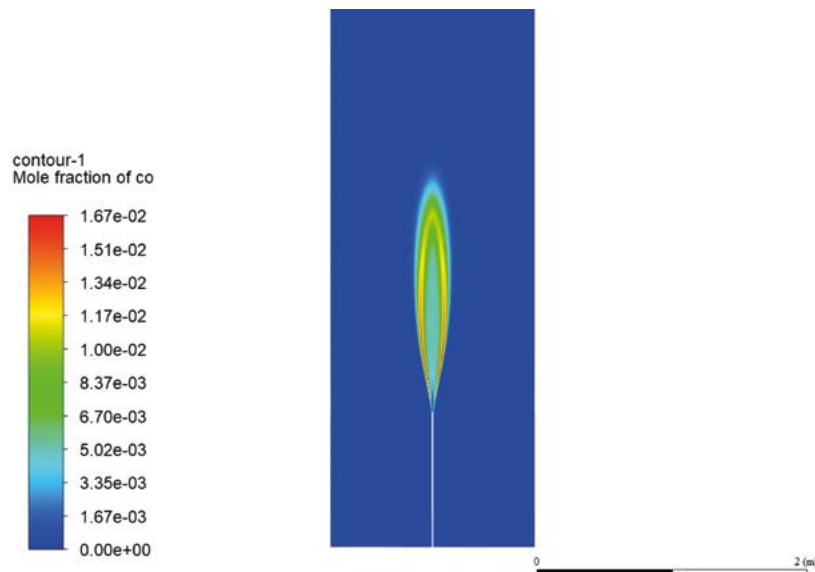
**Figure 6.** Distribution of the mole fraction of oxygen  $y_{O_2}$  in the cross section of the flame-jet2  
**Rycina 6.** Rozkład ułamka molowego tlenu  $y_{O_2}$  w przekroju płomienia-jet2

Source: Own elaboration.  
 Źródło: Opracowanie własne.



**Figure 7.** Distribution of the mole fraction of carbon dioxide  $y_{CO_2}$  in the cross section of the flame-jet2  
**Rycina 7.** Rozkład ułamka molowego dwutlenku węgla  $y_{CO_2}$  w przekroju płomienia-jet2

Source: Own elaboration.  
 Źródło: Opracowanie własne.



**Figure 8.** Distribution of the mole fraction of carbon monoxide  $y_{CO}$  in the cross section of the flame-jet2  
**Rycina 8.** Rozkład ułamka molowego tlenku węgla  $y_{CO}$  w przekroju płomienia-jet2

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

Mathematical modelling with computational fluid dynamics should be related to experimental research. If there is no such possibility, the obtained results of the flame size should be confronted with literature correlations. Table 3 shows the correlations allowing for the calculation of the flame length  $L_f$  and the  $s_{lift-off}$  mixing path depending on the fuel outlet conditions.

Modelowanie matematyczne przy pomocy obliczeniowej mechaniki płynów powinno być odniesione do badań doświadczalnych. W przypadku, gdy takiej możliwości nie ma należy skonfrontować otrzymane wyniki rozmiaru płomienia z korelacjami literaturowymi. W tabeli 3 pokazano korelacje pozwalające na obliczenia długości płomienia  $L_f$  oraz drogi mieszania  $s_{lift-off}$  w zależności od warunków wylotowych paliwa.

**Table 3.** Summary of literature correlations regarding vertical propane jet fires

**Tabela 3.** Zestawienie korelacji literaturowych dotyczących pionowych pożarów strumieniowych propanu

Autor	$d_{nozzle}$ [mm]	Fr	$L_f/d_{nozzle}$ [-]	$s_{lift-off}/d_{nozzle}$ [-]
Sonju [10]	<2–80>	<80–10 <sup>5</sup> >	$27Fr^{0.2}$	$3,6 \cdot 10^{-3}(u/d_{nozzle})$
Palacios [8]	<10–43>	<1000–10 <sup>6</sup> >	$61Fr^{0.11}$	$(0,62/d_{nozzle})Fr^{0.3}$
Palacios [7]	<10–43,1>	No data	$Re^{0.4}$	No data

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

The guidelines provided by Palacios [6] were used to determine the flame length in CFD simulations. Namely, the length of the flame is determined at the point where the flame temperature  $T_{flame}$  is greater than or equal to 800 [K]. Based on this assumption, the obtained flame lengths from the CFD results were compared with the results of literature correlation presented in Table 3. As can be seen from the data in Table 4, the length specified in CFD simulations is confirmed by the values determined with the use of literature correlations. But the values from the CFD simulation are

Określanie długości płomienia w symulacjach CFD oparto o wytyczne podane przez Palacios [6]. Oznacza to, że długość płomienia wyznaczana jest w miejscu, w którym temperatura płomienia  $T_{flame}$  jest większa lub równa 800 [K]. W oparciu o to założenie porównano otrzymane długości płomienia z wynikami CFD z wynikami korelacji literaturowych przedstawionych w tabeli 3. Jak wynika z danych zamieszczonych w tabeli 4, długość określona w symulacjach CFD znajduje potwierdzenie w wartościach określonych przy pomocy korelacji literaturowych. Przy czym

clearly closer to the value from the correlation based on the Reynolds number [7] than from the other correlations. Unfortunately, the comparison of the  $s_{lift-off}$  mixing path values clearly shows that the correlations given by Palacios [8] and Sonju [10] give much higher values of the mixing path than the CFD simulations. Most of the correlations in literature are calculated by the mixing path based on the constant value of the parameter  $(u/d_{nozzle})$ . This may be the reason for the discrepancy between CFD simulations and the correlation given in [10]. At high  $d_{nozzle}$  values, the mass flow of gas has to travel a longer distance before it comes into contact with air, which will initiate combustion reactions. Therefore, research on the influence of the nozzle diameter on the  $s_{lift-off}$  parameter seems to be an important issue. The tests could confirm whether the influence of the parameter  $(u/d_{nozzle})$  on the length of the mixing path is actually linear.

wartości z symulacji CFD są wyraźnie bliższe wartościom z korelacji opartej o liczbę Reynoldsa [7] niż z pozostałych korelacji. Niestety porównanie wartości drogi mieszania  $s_{lift-off}$  wyraźnie pokazuje, że korelacje podane przez Palacios [8] i Sonju [10] podają dużo wyższe wartości drogi mieszania niż symulacje CFD. Większość korelacji literaturowych drogę mieszania oblicza w oparciu o stałą wartość parametru  $(u/d_{nozzle})$ . To może być powód rozbieżności symulacji CFD z korelacją podaną w pracy [10]. Przy dużych wartościach  $d_{nozzle}$ , strumień masowy gazu musi przebyć dłuższą drogę, zanim nastąpi kontakt z powietrzem, który zapoczątkuje reakcje spalania. A zatem istotną kwestią wydaje się zajęcie badaniami wpływu średnicy dyszy na parametr  $s_{lift-off}$ . Badania mogłyby potwierdzić, czy wpływ parametru  $(u/d_{nozzle})$  na długość drogi mieszania rzeczywiście jest liniowy.

**Table 4.** Comparison of CFD results with literature correlations – parameter  $L_f$   
**Tabela 4.** Porównanie wyników CFD z korelacjami literaturowymi – parametr  $L_f$

Name/ Nazwa	$L_f$ CFD	$s_{lift-off}$ CFD	$L_f$ Sonju [10]	$s_{lift-off}$ Sonju [10]	$L_f$ Palacios [8]	$s_{lift-off}$ Palacios [8]	$L_f$ Palacios [7]
	[m]	[cm]	[m]	[cm]	[m]	[cm]	[m]
Jet1	0.9545	1.84	1.424	7.2	1.522	7.5	0.718
Jet2	1.39	2.42	1.879	14.2	1.773	11.38	0.948
Jet3	1.6177	2.50	2.209	21.6	1.938	14.51	1.115

Source: Own elaboration.  
Źródło: Opracowanie własne.

## Summary

The k- $\omega$  SST turbulence model describes the length of the flame well. The shape of the flame depends on gas velocity at the nozzle outlet. This model does not show the disadvantages of the k- $\epsilon$  model and basic k- $\omega$  models. The turbulence model used in the simulations correctly describes the outlet effects and calculates the concentration changes caused by the gas combustion reaction effectively. The comparison of the results obtained from the simulation with literature correlations allows to observe the problem of determining the mixing path grounded on the correlations based on the value  $(u/d_{nozzle})$  and based on the Froude number. Both relations can be used to calculate real fires, provided that the gas mass flow is similar.

\*\*\*

The publication was prepared under the project No. DOB-BIO7/09/03/2015 entitled "Program for the assessment of the risk of accidents in industrial facilities posing a threat outside their area" financed by the National Centre for Research and Development.

## Podsumowanie

Model burzliwości k- $\omega$  SST dobrze opisuje długość płomienia oraz jego kształt w zależności od prędkości gazu na wylocie z dyszy. Nie wykazuje on wad modelu k- $\epsilon$  i podstawowych modeli k- $\omega$ . Model burzliwości użyty w symulacjach poprawnie opisuje efekty wylotowe oraz dobrze oblicza zmiany stężenia spowodowane reakcją spalania gazu. Porównanie wyników otrzymanych na podstawie symulacji z korelacjami literaturowymi pozwala na uchwycenie problemu wyznaczania drogi mieszania w oparciu o korelacje oparte na wartości  $(u/d_{nozzle})$  oraz o liczbę Froude'a. Obie zależności mogą być stosowane do obliczeń rzeczywistych pożarów pod warunkiem zbliżonych wartości strumienia masowego gazu.

\*\*\*

Publikacja została opracowana w ramach projektu nr DOB-BIO7/09/03/2015 pod tytułem „Program do oceny ryzyka wystąpienia awarii w obiektach przemysłowych stwarzających zagrożenie poza swoim terenem” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

## List of abbreviations

$d_{\text{nozzle}}$	– nozzle diameter, m
$D_{\text{km}}$	– diffusion coefficient of the kth component in the mixture, $\text{m}^2\text{s}^{-1}$
$D_{\text{eff}}$	– effective diffusion coefficient, $\text{m}^2\text{s}^{-1}$
$f_i$	– gravitational acceleration, $\text{ms}^{-2}$
Fr	– froude number
$h_k$	– enthalpy of k-component, $\text{Jkg}^{-1}$
H	– enthalpy of the mixture, $\text{Jkg}^{-1}$
l	– turbulence intensity, %
k	– kinetic energy of turbulence, $\text{m}^2\text{s}^{-2}$
$L_f$	– flame length, m
P	– pressure, Pa
$Pr_t$	– turbulent Prandtl number
Re	– reynolds number
$R_k$	– chemical reaction rate, $\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$
$S_{\text{lift-off}}$	– length of the gas mixing path, m
$Sc_t$	– turbulent Schmidt number
$S_k$	– heat generated by the chemical reaction of $\text{Wm}^{-3}$
$S_{\text{rad}}$	– heat exchanged due to radiation, $\text{Wm}^{-3}$
u	– speed, $\text{ms}^{-1}$

### Greek symbols

$\lambda_m$	– thermal conductivity of the mixture, $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
$\lambda_{\text{eff}}$	– effective thermal conductivity of the mixture, $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
$\mu_m$	– dynamic viscosity coefficient of the mixture, $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
$\mu_{\text{eff}}$	– effective dynamic viscosity coefficient, $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
$\mu_t$	– dynamic turbulent viscosity index, $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
$\rho$	– density of mixture, $\text{kgm}^{-3}$
$\varphi_k$	– mass fraction of k-th component
$\omega$	– specific turbulence dissipation rate, $\text{s}^{-1}$

## Literature / Literatura

- [1] Cumber P.S., Spearpoint M., *A computational flame length methodology for propane jet fires*, „Fire Safety Journal” 2006, 41, 215, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.01.003>.
- [2] Kalghatgi G., *Lift-off Heights and Visible Lengths of Vertical Turbulent Jet Diffusion Flames in Still Air*, „Combustion Science and Technology” 1984, 41, 17, <https://doi.org/10.1080/00102208408923819>.
- [3] Magnussen B.F., Hjertager B.H., *On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion*, „Symposium (International) on Combustion” 1977, 16 (1), 719, [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(77\)80366-4](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80366-4).
- [4] Mashhadimoslem H., Ghaemi A., Behroozi A.H. i in., *A New simplified calculation model of geometric thermal features of a vertical propane jet fire based on experimental and computational studies*, „Process Safety and Environmental Protection” 2020, Vol. 135, 301, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.01.009>
- [5] Mashhadimoslem H., Ghaemi A., Palacios A., *Analysis of deep learning neural network combined with experiments to develop predictive models for a propane vertical jet fire*, „Heliyon” 2020, 6, e05511, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05511>.
- [6] Palacios A., Casal J., *Assessment of the shape of vertical*

## Wykaz skrótów

$C_{\text{pm}}$	– ciepło właściwe mieszaniny gazowej, $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
$d_{\text{nozzle}}$	– średnica dyszy, m
$D_{\text{km}}$	– współczynnik dyfuzji k-tego składnika w mieszaninie, $\text{m}^2\text{s}^{-1}$
$D_{\text{eff}}$	– efektywny współczynnik dyfuzji, $\text{m}^2\text{s}^{-1}$
$f_i$	– przyspieszenie grawitacyjne, $\text{ms}^{-2}$
Fr	– liczba Froude’a
$h_k$	– entalpia k- tego składnika, $\text{Jkg}^{-1}$
H	– entalpia mieszaniny, $\text{Jkg}^{-1}$
l	– intensywność turbulencji, %
k	– energia kinetyczna turbulencji, $\text{m}^2\text{s}^{-2}$
$L_f$	– długość płomienia, m
P	– ciśnienie, Pa
$Pr_t$	– turbulentna liczba Prandtla
Re	– liczba Reynoldsa
$R_k$	– szybkość reakcji chemicznej, $\text{kg m}^{-3}\text{s}^{-1}$
$S_{\text{lift-off}}$	– długość drogi mieszania gazu, m
$Sc_t$	– turbulentna liczba Schmidta
$S_k$	– strumień energii generowany przez reakcje chemiczną $\text{Wm}^{-3}$
$S_{\text{rad}}$	– strumień energii wymieniony na skutek radiacji, $\text{Wm}^{-3}$
u	– prędkość, $\text{ms}^{-1}$

### Symbole greckie

$\lambda_m$	– współczynnik przewodzenia ciepła mieszaniny, $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
$\lambda_{\text{eff}}$	– efektywny współczynnik przewodzenia ciepła mieszanin, $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
$\mu_m$	– współczynnik lepkości dynamicznej mieszaniny, $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
$\mu_{\text{eff}}$	– efektywny współczynnik lepkości dynamicznej, $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
$\mu_t$	– współczynnik lepkości burzliwej, $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
$\rho$	– gęstość mieszaniny, $\text{kgm}^{-3}$
$\varphi_k$	– ułamek masowy k- tego składnika
$\omega$	– właściwa dyssypacja energii kinetycznej turbulencji, $\text{s}^{-1}$

- jet fires*, „Fuel” 2011, 90, 824, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.09.048>.
- [7] Palacios A., Munoz M., Darbra R.M. i in., *Thermal radiation from vertical jet fires*, „Fire Safety Journal” 2012, 51, 93, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.03.006>.
- [8] Palacios A., Munoz M., Casal J., *Jet fires: An experimental study of the main geometrical features of the flame in subsonic and sonic regimes*, „AIChE” 2009, 55 (1), 256, <https://doi.org/10.1002/aic.11653>.
- [9] Russo F., Basse N.T., *Scaling of turbulence intensity for low-speed flow in smooth pipes*, „Flow Measurement and Instrumentation” 2016, 52, 101, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.09.012>.
- [10] Sonju O.K., Hustad J.E., *An experimental study of turbulent jet diffusion flames*, „American Institute of Aeronautics and Astronautics” 1985, <https://doi.org/10.2514/5.9781600865701.0320.0339>.
- [11] Vogel E. i in., *Reference Correlation of the Viscosity of Propane*, „Journal of Physical and Chemical Reference Data” 1998, 27, 947, <https://doi.org/10.1063/1.556025>.
- [12] Zhang B., Liu Y., Laboureur D. i in., *Experimental Study on Propane Jet Fire Hazards: Thermal Radiation*, „Industrial & Engineering Chemistry Research” 2015, 54, 9251, <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b02064>.
- [13] <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node115.htm> [dostęp: 16.03.2022].

**MICHAŁ WOJCIECH LEWAK, PH.D. ENG.** – in 2005, he began doctoral studies at the Faculty of Chemical and Process Engineering of the Warsaw University of Technology. In 2011, he obtained a doctorate with honors, specializing in chemical engineering. Since 2011, he has been a research and teaching worker at the Warsaw University of Technology. He works as a lecturer at the Division of Kinetics and Process Thermodynamics at the Faculty of Chemical and Process Engineering. He deals with mathematical modeling of mass, heat and energy transport phenomena in physicochemical systems with particular emphasis on methods related to computational fluid mechanics. In addition, he deals with process safety issues in chemical reactors, mathematical modeling related to jet fire and contamination spreading.

**JAROSŁAW TĘPIŃSKI, PH.D. ENG.** – graduated from the Faculty of Electrical Engineering of the Warsaw University of Technology with a specialization in Automation and Computer Engineering. In 2016, at the same faculty, he obtained a doctoral degree in technical sciences. Currently, he is an assistant professor at Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwożarowej – Państwowy Instytut Badawczy (CNBOP-PIB) in Józefów and a head of a research and scientific project entitled “A program for assessing the risk of accidents in industrial facilities posing a threat outside their premises”. Specialty – electrical engineering, automation and technical fire protection systems.

**JUNIOR BRIG. WOJCIECH KLAPSA, M.SC. ENG** – a graduate of the Main School of Fire Service in Warsaw and the Military University of Technology in Warsaw, Faculty of Chemistry. Currently, he serves at Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwożarowej – Państwowy Instytut Badawczy in the Laboratory of Combustion Processes and Explosions as a manager. Author or co-author of articles on fire safety and flammable properties of building materials. At CNBOP-PIB, he deals with the subject of technical expertise of buildings, court opinions in the field of determining the causes of fires and research in the field of reaction to fire of construction products, as well as determining the explosive parameters of flammable substances. A speaker at national and international conferences, as well as a lecturer during exercises, workshops and training during training courses and other courses.

**DR. INŻ. MICHAŁ WOJCIECH LEWAK** – w roku 2005 rozpoczął studia doktoranckie na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej. W roku 2011 uzyskał z wyróżnieniem stopień doktora specjalność inżynieria chemiczna. Od 2011 roku jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Politechniki Warszawskiej. Pracuje na stanowisku adiunkta w Zakładzie Kinetyki i Termodynamiki Procesowej na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej. Zajmuje się modelowaniem matematycznym zjawisk transportu masy, ciepła i energii w układach fizykochemicznych ze szczególnym uwzględnieniem metod związanych z obliczeniową mechaniką płynów. Ponadto zajmuje się problemami bezpieczeństwa procesowego w reaktorach chemicznych, modelowaniem matematycznym związanym z pożarem strumieniowym i rozprzestrzenianiem się zanieczyszczeń.

**DR. INŻ. JAROSŁAW TĘPIŃSKI** – w 2008 r. ukończył studia o specjalności Automatyka i Inżynieria Komputerowa na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Na tym samym wydziale w 2016 r. uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych. Obecnie jest adiunktem w Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwożarowej – Państwowym Instytucie Badawczym w Józefowie oraz kierownikiem projektu badawczo-naukowego pt. „Program do oceny ryzyka wystąpienia awarii w obiektach przemysłowych stwarzających zagrożenie poza swoim terenem”. Specjalność – elektrotechnika, automatyka oraz techniczne systemy zabezpieczeń przeciwpożarowych.

**MŁ. BRYG. MGR INŻ. WOJCIECH KLAPSA** – absolwent Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie i Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie Wydziału Chemii. Obecnie pełni służbę w Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwożarowej – Państwowym Instytucie Badawczym w Zespole Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości na stanowisku Kierownika. Autor lub współautor artykułów o tematyce bezpieczeństwa pożarowego oraz właściwości palnych materiałów budowlanych. W CNBOP-PIB zajmuje się tematyką ekspertyz technicznych budynków, opinii sądowych w zakresie ustalania przyczyn pożarów oraz badaniami w zakresie reakcji na ogień wyrobów budowlanych, a także wyznaczaniem parametrów wybuchowych substancji palnych. Prelegent na konferencjach krajowych i zagranicznych, a także wykładowca podczas ćwiczeń oraz warsztatów i treningów na szkoleniach i kursach.