

dr hab. inż. Jerzy Gałaj, prof. uczelni^{1)*}

ORCID: 0000-0002-1509-6733

dr inż. Tomasz Drzymala²⁾

ORCID: 0000-0001-9568-3235

mgr inż. Bartosz Smerdel²⁾

Assessment of the impact of combustion of selected flammable materials on the possibility of evacuation in fire conditions

Ocena wpływu spalania wybranych materiałów palnych na możliwość ewakuacji w warunkach pożaru

DOI: 10.15199/33.2025.10.14

Abstract. The main objective of this article was to assess the impact of combustion of selected flammable materials on the possibility of evacuation in fire conditions. To achieve this, a computer simulation method was used, using a tool dedicated to this type of research, the PyroSim program. Combustion tests were carried out on materials often used in modern rooms such as nylon, propylene, polyurethane, and pine and oak wood. A fire was assumed in the corner of a room with an area of approximately 22 m² and a height of approximately 3.6 m with a ceiling beam and one column, as well as one door opening and six windows. The article presents the time histories of the heat release rate HRR and the total released heat Q_{TOTAL} during the combustion of selected materials. As a result of the simulation studies, spatial distributions of temperature and smoke were also obtained after 10, 20 and 30 seconds of simulation. Taking into account the recorded temperature distribution in the room and its smoke (except for pine wood), it can be stated that safe evacuation is only possible for the first 10 s. After this time, safe evacuation can only be carried out in a bent position with bent legs. Over time, you should move closer to the floor.

Keywords: internal fire; PyroSim; fire and smoke propagation; temperature distribution; evacuation in fire conditions; CFD technology.

Streszczenie. Głównym celem artykułu było omówienie wpływu spalania wybranych materiałów palnych na możliwość ewakuacji w warunkach pożaru metodą symulacji komputerowej w programie PyroSim. Przeprowadzono badania spalania takich materiałów często wykorzystywanych we współczesnych pomieszczeniach, jak nylon, propylen, poliuretan oraz drewno sosnowe i dębowe. Założono pożar w rogu pomieszczenia o powierzchni ok. 22 m² i wysokości ok. 3,6 m z belką stropową i jednym słupem, a także jednym otworem drzwiowym i sześcioma oknami. Zaprezentowano przebiegi czasowe szybkości wydzielania ciepła HRR oraz całkowitego wydzielonego ciepła Q_{TOTAL} podczas spalania wybranych materiałów. W wyniku badań symulacyjnych otrzymano również przestrzenne rozkłady temperatury i zadymienia po 10, 20 i 30 s symulacji. Biorąc pod uwagę zarejestrowany rozkład temperatury w pomieszczeniu oraz jego zadymienie stwierdzono, że bezpieczna ewakuacja jest możliwa tylko przez pierwsze 10 s. Po tym czasie może być prowadzona jedynie w pozycji pochylonej z ugiętymi nogami. Wraz z upływem czasu należy przyjmować pozycję bliższą podłogi.

Słowa kluczowe: pożar wewnętrzny; program PyroSim; rozwój pożaru i zadymienia; rozkład temperatury; ewakuacja w warunkach pożaru; technologia CFD.

The development of civilization and technology has contributed to the emergence of various hazards, one of the most serious of which is fire. Urbanization and the emergence of increasingly large urban agglomerations, characterized by multi-story buildings that facilitate the rapid spread of fire, are also significant. This simultaneously results in the rapid development of increasingly refined fire protection systems, which require constant changes in building and fire regulations [1]. Fire is an uncontrolled combustion process occurring outside its designated area, causing material losses. Detailed information on its origin, propagation, and individual phases can be found in [2 – 4].

Rozwój cywilizacji i technologii przyczynił się do powstania różnorodnych zagrożeń, spośród których jednym z poważniejszych jest pożar. Istotne znaczenie ma również urbanizacja i powstawanie coraz większych aglomeracji miejskich, których cechą charakterystyczną jest wielokondygnacyjne budownictwo sprzyjające gwałtownemu rozprzestrzenianiu się pożaru. Skutkuje to szybkim rozwojem coraz bardziej udoskonalanych systemów zabezpieczeń przeciwpożarowych, które wymagają ciągłych zmian przepisów prawa budowlanego i pożarowego [1]. Pożar to niekontrolowany proces spalania zachodzący poza miejscem do tego celu przeznaczonym, przynoszący straty materialne. Szczegółowe informacje na temat jego powstania, przebiegu oraz poszczególnych faz można znaleźć w pracach [2 – 4].

Podczas pożaru wydzielają się szkodliwe, toksyczne substancje chemiczne, a także niosące zagrożenie czynniki fizyczne i termiczne. Specyficzne warunki pożaru oddziałują

¹⁾ Akademia Pożarnicza, Instytut Inżynierii Bezpieczeństwa

²⁾ Akademia Pożarnicza, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa i Ochrony Ludności

^{*}) Correspondence address: jerzy.galaj@gmail.com

During a fire, harmful and toxic chemicals are released, as well as hazardous physical and thermal factors. Specific fire conditions also have a devastating impact on buildings and installations. Factors that pose a threat to safety during a fire include:

- a) elevated temperature and thermal radiation;
- b) oxygen deficiency;
- c) toxic combustion products;
- d) limited visibility;
- e) noise;
- f) damage to the structure or its components (indirectly).

The degree of impact of individual factors depends on the specific fire situation, the rate of fire development, the type and quantity of flammable materials, the technical conditions of the burning facility, and fire protection measures. Toxic combustion products pose a significant threat to the respiratory and circulatory systems. More detailed information on this topic can be found in [5]. The above description demonstrates that fire is composed of many factors, which can be difficult to clearly describe. Computer fire modeling is a relatively new field of science that studies the complex processes occurring during fires. It introduces event-based algorithms that enable understanding the characteristics of building materials and their reaction to fire. The use of computer technology enables the estimation of fire behavior and the acquisition of data necessary for planning the effective evacuation of endangered individuals from a specific location within a building. Modern computer computational methods, such as those based on the assumptions of computational fluid dynamics, enable the creation of simulations of engineering problems. Numerical models enable the rapid execution of complex calculations that take into account a long list of factors with a significant impact on safety. This facilitates the performance of both universal and specialized analyses of chemical and physical processes related to various processes, such as combustion. Modern computer programs are an adequate tool for simulating the development and effects of fire. *Computational Fluid Dynamics* (CFD) is an important tool in fire safety engineering [6]. CFD is used in many engineering disciplines. It is based on solving fundamental, time- and space-dependent flow/streamline problems, taking into account the principles of conservation of mass, momentum, and energy. Therefore, the general assumption of computational fluid dynamics is to determine approximate solutions to the Navier-Stokes equations using methods that divide the computational domain into finite volumes (FV), finite elements (FEM), or finite differences (FDI) [7, 8]. Thanks to the increased computational capabilities of computers and the greater availability of professional software, computer fire analyses using CFD models have become a useful tool in engineering. CFD models also describe a variety of physical fire phenomena in complex geometries. The methodology based on the use of computer models is useful for verifying many design solutions from the layout of internal building partitions to the design of smoke extraction systems in large and complex buildings [6].

również niszcząco na obiekty budowlane i instalacyjne. Czynniki zagrażającymi bezpieczeństwu w czasie pożaru są:

- a) podwyższona temperatura i promieniowanie ciepłe;
- b) niedobór tlenu;
- c) toksyczne produkty spalania;
- d) ograniczona widoczność;
- e) hałas;
- f) uszkodzenie konstrukcji obiektu lub jego elementów (pośrednio).

Stopień oddziaływania poszczególnych czynników zależy od konkretnej sytuacji pożarowej, szybkości rozwoju pożaru oraz od rodzaju i ilości materiałów palnych, a także uwarunkowań technicznych palącego obiektu i zabezpieczeń przeciwpożarowych. Istotnym zagrożeniem dla układu oddechowego i krwionośnego są toksyczne produkty spalania. Bardziej szczegółowe informacje na ten temat można znaleźć w [5]. Z podanego opisu wynika, że na zjawisko pożaru składa się wiele czynników, których jednoznaczne opisanie może być trudne. Relatywnie nową dziedziną nauki, która zajmuje się badaniem złożonych procesów zachodzących podczas pożaru, jest jego komputerowe modelowanie. Wprowadza ono algorytmy zdarzeń, które umożliwiają poznanie cech materiałów budowlanych oraz ich reakcji na ogień. Wykorzystanie technologii komputerowych ułatwia oszacowanie przebiegu pożaru, oraz uzyskanie danych niezbędnych do planowania efektywnej ewakuacji zagrożonych osób z konkretnego miejsca wewnątrz budynku. Nowoczesne komputerowe metody obliczeniowe, wykorzystujące np. założenia numerycznej mechaniki płynów, pozwalają na tworzenie symulacji problemów inżynierskich. Dzięki modelom numerycznym możliwe jest szybkie dokonywanie skomplikowanych obliczeń, które uwzględniają długą listę czynników mających istotny wpływ na bezpieczeństwo. Sprzyja to wykonywaniu zarówno uniwersalnych, jak i specjalistycznych analiz procesów chemicznych i fizycznych związanych z przebiegiem różnych procesów np. spalania. Techniki komputerowe wykorzystujące modele CFD do rozwiązywania matematycznych problemów związanych z komputerową dynamiką płynów (ang. *Computational Fluid Dynamics*) są ważnym narzędziem używanym w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego [6]. Technika CFD używana jest w wielu dyscyplinach inżynierskich. Polega ona na rozwiązywaniu podstawowych, zależnych czasowo i przestrzennie zagadnień przepływowych/opływowych z uwzględnieniem zasad zachowania masy, pędu i energii. Ogólnym założeniem komputerowej mechaniki płynów jest wyznaczanie przybliżonych rozwiązań równań Naviera-Stokesa za pomocą metod wykorzystujących podział domeny obliczeniowej na objętości skończone (MOS), elementy skończone (MES) lub różnice skończone (MRS) [7, 8]. Dzięki możliwościom obliczeniowym komputerów, ale również dużej dostępności profesjonalnego oprogramowania, komputerowe analizy pożarowe z wykorzystaniem modeli CFD stały się użytecznym narzędziem w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. Modele CFD opisują także różnorodne zjawiska fizyczne pożaru w złożonych geometriach. Metoda polegająca na wykorzystaniu modeli komputerowych jest przydatna do weryfikacji wielu rozwiązań projektowych – począwszy od rozkładu wewnętrznych grodzi budowlanych, a skończywszy na projektowaniu systemów oddymiania w dużych i skomplikowanych budynkach [6].

Fire simulation computer programs using CFD techniques, when applied to fire modeling, allow for the definition of combustion reactions and the properties of burning materials, particularly the chemical composition of fuels and other parameters influencing the characteristics of fire development. This development can be described using time-varying parameters such as the gas temperature in the room, heat flux, the volume of thermal decomposition and combustion products and their flow rate, or smoke concentration. The intensive development of CFD in the context of fire analysis has led to the development of so-called field models intended to describe the fire phenomenon. These models use various models of computer turbulence, fluid mechanics, and thermal dynamics, the definition of which requires the use of time-averaged parameters (e.g., velocity, temperature) [8]. Most CFD programs were developed for applications in many engineering disciplines and are commercially available. In recent years, advanced CFD solvers have been developed at various research centers around the world, such as PHOENICS, FLUENT, and JASMINE – Fire Research Station (UK), which are also used to describe fire environments. One of the most popular CFD models currently used in fire safety engineering is the Fire Dynamics Simulator (FDS), developed by the National Institute of Standards and Technology (NIST) in the United States, in collaboration with the Finnish research institute VTT. The FDS program comes with a SmokeView package for graphical presentation of obtained results [9]. This application, like others, utilizes computational fluid dynamics (CFD) methods and is based on approximate solutions of equations describing fluid motion in the computational domain, supplemented by models that allow for solving conduction, convection, and radiation problems. FDS is a tool designed for detailed analysis of fire hazards and solving problems related to fire safety engineering. It provides the ability to understand the dynamics of fire (e.g., by determining the Heat Release Rate (HRR) curve) and the combustion processes occurring there. In fire safety, this program can be used to model heat transfer and combustion products resulting from fire, heat transfer through radiation and convection, pyrolysis, flame propagation, and fire development, as well as the activation of sprinklers and smoke detectors [10]. In summary, CFD is a branch of fluid mechanics that allows for detailed analysis of fluid motion issues. This method was originally developed for the description and study of flows and flows. PyroSim [11] is a tool that allows for incorporating a fire component and defining a fire based on selected computational parameters. It allows for conducting fire analyses, taking into account its effects at every stage, from the design of newly developed structures to the operation of existing technical facilities. Examples of the use of this tool to study the development of fire in a room can be found in several of the following works [12 – 14].

The main goal of this paper was to assess the impact of combustion of several combustible materials, such as nylon, propylene, polyurethane, and pine and oak wood, on the possibility of evacuation from a given room in a selected facility during a fire. PyroSim, a fire modeling software tool, was used to achieve this goal.

Programy komputerowe do symulowania pożaru, wykorzystujące techniki CFD, w zastosowaniu do modelowania pożarów, pozwalają definiować reakcje spalania oraz właściwości materiałów spalanych, a szczególnie skład chemiczny paliw oraz innych parametrów mających wpływ na charakterystykę rozwoju pożaru. Rozwój ten może być opisywany za pomocą parametrów zmiennych w czasie, takich jak temperatura gazu w pomieszczeniu, strumień ciepła, objętość produktów rozkładu termicznego i spalania oraz prędkość ich przepływu czy stężenie dymu. Intensywny rozwój CFD w kontekście analiz pożarowych doprowadził do rozwoju tzw. modeli polowych przeznaczonych do opisu zjawiska pożaru. Modele te korzystają z różnych modeli turbulencji komputerowej mechaniki płynów i termodynamiki, których definicja wymaga wykorzystania parametrów (np. prędkości, temperatury) uśrednionych w czasie [8]. W ostatnich latach w różnych ośrodkach naukowych na świecie powstały i są rozwijane zaawansowane solvery CFD, takie jak: PHOENICS, FLUENT, JASMINE – FireResearch Station (Wielka Brytania), wykorzystywane również do opisu środowiska pożaru. Jednym z najpopularniejszych modeli CFD, stosowanych obecnie w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego, jest Fire Dynamics Simulator (FDS) rozwijany przez National Institute of Standards and Technology (NIST) w Stanach Zjednoczonych, we współpracy z fińskim instytutem naukowo-badawczym VTT. Wraz z programem FDS dostarczany jest pakiet SmokeView, który służy do graficznej prezentacji otrzymanych wyników [9]. Aplikacja ta, podobnie jak inne, wykorzystuje metody obliczeniowe numerycznej mechaniki płynów CFD i bazuje na rozwiązaniach przybliżonych równań, opisujących ruch płynu w domenie obliczeniowej, uzupełnianych modelami pozwalającymi rozwiązywać zagadnienia kondukcyjne, konwekcyjne i radiacyjne. FDS jest narzędziem przeznaczonym do szczegółowej analizy zagrożeń pożarowych i rozwiązywania problemów związanych z inżynierią bezpieczeństwa pożarowego. Zapewnia możliwość poznania dynamiki zjawiska pożaru (np. umożliwia wyznaczenie przebiegu krzywej obciążenia ogniowego HRR – ang. *Heat Release Rate*) oraz zachodzących tam procesów spalania. Program ten można stosować do modelowania transportu ciepła i produktów spalania powstałych na skutek pożaru, wymiany ciepła przez promieniowanie i konwekcję, pirolizy, rozprzestrzeniania się płomieni i rozwoju pożaru, ale także aktywacji tryskaczy oraz czujek dymu [10]. CFD jest gałęzią mechaniki płynów, umożliwiającą przeprowadzanie szczegółowej analizy zagadnień związanych z ruchem płynów. Metoda ta powstała na potrzeby opisu i badania przepływów i opływów. Narzędziem pozwalającym dołączyć komponent pożarowy i definiować pożar na podstawie wybranych parametrów obliczeniowych jest program PyroSim [11]. Dzięki niemu możliwe jest prowadzenie analiz pożaru z uwzględnieniem skutków jego przebiegu na każdym etapie począwszy od projektowania nowo opracowywanych konstrukcji po eksploatację już istniejących obiektów technicznych. Przykładowe zastosowanie tego narzędzia do badania rozwoju pożaru w pomieszczeniu można znaleźć w pracach [12 – 14].

Głównym celem artykułu była ocena wpływu spalania kilku materiałów palnych, takich jak: nylon, propylen, poliuretan oraz drewno sosnowe i dębowe na możliwości ewakuacji w warunkach

Research methods

The primary tool used to conduct the simulation was PyroSim software, a graphical interface and integrator for the Fire Dynamic Simulator (FDS) field fire model. This software enables, among other things:

- a) the creation of three-dimensional simulation models in an intuitive graphical environment;
- b) the quantitative and qualitative assessment of fire hazards;
- c) the modeling of fire development for various fire scenarios;
- d) convenient visualization of analysis results, for example, using the built-in SmokeView browser;
- e) automatic support for multi-core processors;
- f) the use of a wide range of devices used in fire engineering;
- g) the use of a wide range of materials (fuels);
- h) the design of smoke extraction systems (gravitational and mechanical) and the simulation of the operation of ventilation and air conditioning (HVAC) systems;
- i) the use of devices that are components of fire monitoring and prevention systems (smoke detectors, sprinklers, deluges, thermocouples).

The program's core functionality is that of building a geometric model within a domain. PyroSim provides tools that help users interactively create model geometry. These tools allow for the drawing of building partitions (external and internal), obstacles, inclined walls, blocks, and rooms, as well as other objects related to ventilation processes, fulfilling multiple functions and defined both within and at the boundaries of computational networks. These features also include those for modifying existing objects, such as tools for creating openings in already defined building partitions. One of the main tools is the navigation window, which contains all important information about the model. The window, organized in a tree structure, allows for the replay of the model's construction history and contains essential information about the geometry and simulation parameters. Locating and modifying model elements in the navigation window is much easier than using the FDS source code, significantly streamlining workflow. The navigation window and all tools for creating geometry are located on the taskbar on the left side of the main window. The main program window is shown in Figure 1.

One of the most important steps in creating a selected geometric model in the program is creating a computational network. The program allows for the creation of meshes based solely on rectangular computational cells. The mesh boundaries constitute the external

pożaru z danego pomieszczenia w wybranym obiekcie. Aby go zrealizować, wykorzystano narzędzie programistyczne przeznaczone do modelowania pożaru, jakim jest program PyroSim.

Metody badań

Podstawowym narzędziem, które wykorzystano do wykonania symulacji, było oprogramowanie PyroSim stanowiące graficzny interfejs i integrator polowego modelu pożaru Fire Dynamic Simulator (FDS), który umożliwia m.in.:

- a) tworzenie trójwymiarowych modeli symulacyjnych w intuicyjnym środowisku graficznym;
- b) ilościową i jakościową ocenę zagrożeń wywołanych pożarem,
- c) modelowanie rozwoju pożaru w przypadku różnorodnych scenariuszy pożarowych;
- d) dogodną wizualizację wyników analiz np. za pomocą wbudowanej przeglądarki SmokeView;
- e) automatyczną obsługę wielordzeniowych procesorów;
- f) korzystanie z bogatej bazy urządzeń wykorzystywanych w inżynierii pożarowej;
- g) wykorzystanie bogatej bazy materiałowej (paliw);
- h) projektowanie systemów oddymiających (gravitacyjnych i mechanicznych) oraz odwzorowanie pracy instalacji wentylacyjnych i klimatyzacyjnych (HVAC);
- i) wykorzystywanie urządzeń stanowiących elementy systemów dozoru i przeciwdziałania rozwojowi pożarów (czujniki dymu, tryskacze, zraszacze, termopary).

Zasadniczą grupą funkcji programu są te, które pozwalają na budowę modelu geometrycznego w domenie. PyroSim udostępnia narzędzia, które pomagają użytkownikowi stworzyć geometrię modelu w trybie interaktywnym, a więc m.in. rysowanie grodzi budowlanych (zewnętrznych i wewnętrznych), przeszkód, ukośnych ścian, bloków i pokoi, a także innych obiektów związanych z procesami wentylacji, spełniających wielorakie funkcje zarówno wewnątrz, jak i na granicy sieci obliczeniowych. Wśród omawianych funkcji znaleźć można także te, które służą do modyfikowania już istniejących obiektów, np. narzędzia do tworzenia otworów w już zdefiniowanych grodziach budowlanych. Jednym z głównych narzędzi jest okno nawigacji zawierające wszystkie ważne informacje o modelu. Okno w formie struktury drzewa pozwala na odtwarzanie historii budowy modelu i zawiera niezbędne informacje dotyczące geometrii oraz parametrów symulacji. Lokalizowanie i modyfikowanie elementów modelu w oknie nawigacji jest znacznie łatwiejsze niż z wykorzystaniem kodu źródłowego FDS, co znacznie usprawnia pracę. Okno nawigacji, jak i wszystkie narzędzia przeznaczone do tworzenia geometrii, znajduje się na pasku zadań po lewej stronie okna głównego. Widok głównego okna programu pokazano na rysunku 1.

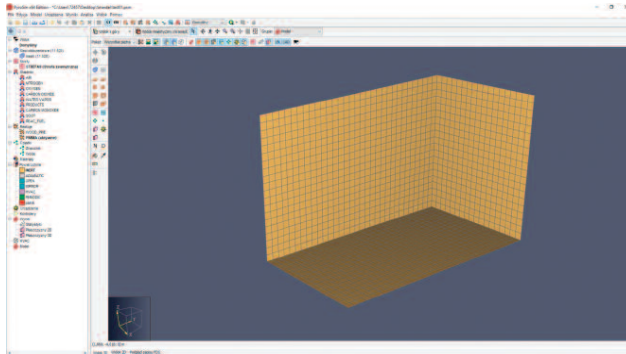


Fig. 1. The main window of PyroSim with the taskbar and calculation grid visible

Rys. 1. Główne okno programu PyroSim z widocznym paskiem zadań i siatką obliczeniową

boundaries of the computational domain in which the model geometry is created. All FDS calculations are performed within the computational network. Mesh parameters are selected depending on the specific computational case and the purpose of the simulation. To achieve optimal simulation accuracy in terms of the reliability of the obtained results, it is important to select the appropriate mesh for the calculations. A general characteristic of an acceptable mesh, which should be checked first during its creation, is maintaining a constant ratio of the number of elements to the lengths of the objects for each of the three directions of the Cartesian coordinate system [11]. For simulation purposes, a specific room located on the premises of the Military University of Technology was selected, the virtual geometric model of which is shown in Figure 2.

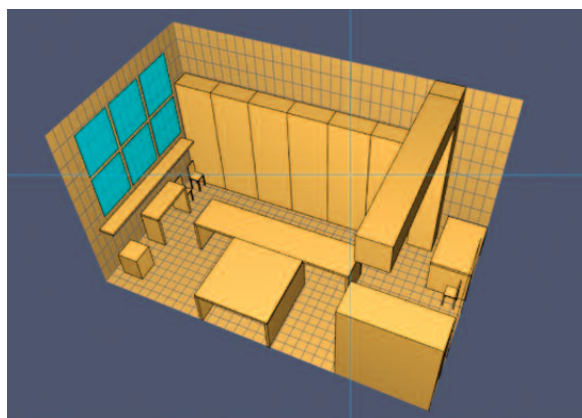


Fig. 2. Virtual model of the selected compartment

Rys. 2. Wirtualny model wybranego pomieszczenia

The presented room is

characterized by the following parameters:

- area – 22.38 m² (length 6.34 m, width 3.53 m);
- average wall height – 3.6 m;
- doors – width 0.96 m, height 2.06 m, opening outwards;
- windows (6) located opposite the doors (4 opening).

A necessary step in creating the numerical model was to create a computational mesh based on the assumed room dimensions by entering the modeled room boundaries. A structural mesh reproducing the domain shape was used to create the model. The dimensions of a single cell were 0.1 x 0.1 x 0.1 m, bringing the total number of cells to 79,380. After creating the mesh using geometry creation tools, all the interior objects in the room were added, described later in the paper. All geometries were created manually by entering the X, Y, and Z coordinates of specific objects reproducing the details of the room's structure (ceiling beam, side column) and its furnishings. The following geometric model elements were specified along with their basic dimensions (length x width x height):

- 1) desks (2 pcs.) covering a significant part of the room with the total dimensions of the outer outline of two desks: 3.18 x 2.12 x 0.75 m;
- 2) cabinets (3 pcs.) with dimensions each: 0.42 x 0.40 x 0.53 m;
- 3) table located under the windowsill with dimensions: 0.4 x 1 x 0.81 m;
- 4) windowsill with dimensions: 0.25 x 2.73 x 0.05 m (its lower edge is at a height of 1.14 m from the floor);
- 5) wardrobes (6 pcs.) located on the right side of the room (looking towards the windows), each with dimensions: 0.8 x 0.38 x 2.54 m;

Jedną z najważniejszych czynności podczas tworzenia wybranego modelu geometrycznego w programie jest stworzenie sieci obliczeniowej. Program umożliwia tworzenie siatek jedynie na bazie prostokątnych komórek obliczeniowych. Jednocześnie granice siatki stanowią granice zewnętrzne domeny obliczeniowej, w której tworzona jest geometria modelowa. Wszystkie obliczenia FDS wykonywane są wewnątrz sieci obliczeniowej. Parametry siatki są dobierane w zależności od konkretnego przypadku obliczeniowego oraz celu, w jakim symulacje są wykonywane. W celu osiągnięcia optymalnej dokładności symulacji, pod względem wiarygodności otrzymywanych wyników, należy zadbać o właściwy dobór siatki do obliczeń. Cechą ogólną akceptowalnej siatki, którą należy sprawdzać w pierwszej kolejności jej tworzenia, jest to, aby zachować stały stosunek liczby elementów względem długości obiektów w przypadku każdego z trzech kierunków kartezjańskiego układu współrzędnych [11]. Dla celów symulacji wybrano konkretne pomieszczenie znajdujące się na terenie Wojskowej Akademii Technicznej, którego wirtualny model geometryczny pokazano na rysunku 2.

Prezentowany pokój charakteryzuje się następującymi parametrami:

następującymi parametrami:

- powierzchnia – 22,38 m² (długość 6,34 m, szerokość 3,53 m);
- średnia wysokość ścian – 3,6 m;
- drzwi – szerokość 0,96 m, wysokość 2,06 m, otwierane w kierunku zewnętrznym;
- okna (6 szt.) usytuowane naprzeciwko drzwi (4 szt. otwierane).

Koniecznym elementem do wykonania modelu numerycznego było stworzenie siatki obliczeniowej zgodnie z przyjętymi wymiarami pomieszczenia przez wprowadzenie granic modelowanego pokoju. Przy wykonywaniu modelu zastosowano siatkę strukturalną odtwarzającą kształt domeny. Wymiary jej pojedynczej komórki wynosiły 0,1 x 0,1 x 0,1 m, co sprawiło, że całkowita liczba komórek wyniosła 79380. Po utworzeniu siatki za pomocą narzędzi do tworzenia geometrii dodane zostały wszystkie obiekty wewnętrzne znajdujące się w pokoju. Wszystkie geometrie były tworzone ręcznie przez wprowadzanie współrzędnych X, Y, Z konkretnych obiektów odtwarzających detale konstrukcji pokoju (belka stropowa, słup boczny) oraz jego wyposażenia. Wyszczególnione zostały następujące elementy modelu geometrycznego wraz z ich podstawowymi wymiarami (długość x szerokość x wysokość):

- 1) biurka (2 szt.) obejmujące znaczną część powierzchni pokoju o łącznych wymiarach bryły obrysu zewnętrznego dwóch biur: 3,18 x 2,12 x 0,75 m;
- 2) szafki (3 szt.) o wymiarach każda: 0,42 x 0,40 x 0,53 m;
- 3) stolik znajdujący się pod parapetem o wymiarach: 0,4 x 1 x 0,81 m;
- 4) parapet o wymiarach: 0,25 x 2,73 x 0,05 m (jego dolna krawędź znajduje się na wysokości 1,14 m od podłogi);
- 5) szafy (6 szt.) usytuowane po prawej stronie pomieszczenia (patrząc w kierunku okien) każda o wymiarach: 0,8 x 0,38 x 2,54 m;

- 6) table with dimensions: 0.73 x 1.19 x 0.75 m;
 7) wardrobe with dimensions: 1.61 x 0.6 x 1.8 m;
 8) ceiling beam with dimensions: 0.49 x 3.13 x 0.51 m;
 9) column with dimensions: 0.49 x 0.40 x 3.6 m;
 10) door with dimensions: width 0.96 m and height 2.06 m;

11) windows (6 pcs.) located opposite the door: 4 opening pcs. 0.81 x 0.90 m, 2 non-opening pcs. 0.87 x 0.90 m (width x height [m]).

The equipment in the modeled room was assigned pine wood parameters. Since this article focuses primarily on smoke propagation and temperature changes during a fire, rather than flame propagation between the model's components, the authors believe this approach was justified. To conduct the simulation, the model required the creation of a suitable burner surface resembling the combustible surface, the location of which is shown in Figure 3.

The choice of location for the burner was based on two considerations. Firstly, the most dangerous situation from the perspective of a safe evacuation process occurs when the fire is located in the immediate vicinity of the main emergency exit. Secondly, this was related to the actual layout of the room for which the simulation was performed, as this was the location of the technical and sanitary unit in the selected room. The burner created covered the entire surface of the tabletop, equal to 0.87 m², located at a height of 0.75 m from the floor. Based on information provided in [15], the heat release value HRR per unit area was assumed to be 500 kW/m². The essential part of the simulations was to verify the impact of selected fire hazards on the possibility of effective evacuation, depending on the type of material burned. The materials used in the study were selected from a library provided by the software. The following materials, frequently used in interior design elements, were tested: nylon (polyamide), propylene, polyurethane, pine wood, and oak wood. The list of materials used in this work and their composition is presented in Table 1. Their more detailed description can be found in [16].

One of the most important features of the FDS simulation is the

- 6) stolik o wymiarach: 0,73 x 1,19 x 0,75 m;
 7) szafa o wymiarach: 1,61 x 0,6 x 1,8 m;
 8) belka stropowa o wymiarach: 0,49 x 3,13 x 0,51 m;
 9) słup o wymiarach: 0,49 x 0,40 x 3,6 m;
 10) drzwi o wymiarach: szerokość 0,96 m oraz wysokość 2,06 m,

11) okna (6 szt.) usytuowane naprzeciwko drzwi: 4 szt. otwierane 0,81 x 0,90 m, 2 szt. nieotwierane 0,87 x 0,90 m (szerokość x wysokość [m]).

Wyposażeniu znajdującemu się w modelowanym pomieszczeniu przypisano parametry drewna sosnowego. W artykule skupiono się przede wszystkim na rozchodzeniu się dymu oraz zmianach temperatury podczas pożaru, a nie na rozprzestrzenianiu się płomienia pomiędzy elementami znajdującymi się w modelu. Naszym zdaniem, takie podejście było uzasadnione. Aby przeprowadzić symulację, niezbędne było utworzenie odpowiedniego rodzaju powierzchni palnika odtwarzającego powierzchnię palną, którego lokalizację pokazano na rysunku 3.

Wybór miejsca usytuowania palnika wynikał z dwóch względów. Po pierwsze, najbardziej niebezpieczna sytuacja, z punktu widzenia procesu bezpiecznej ewakuacji, ma miejsce wówczas, kiedy ognisko pożaru znajduje się w bezpośredniej bliskości głównego wyjścia ewakuacyjnego. Po drugie, było ono związane z odwzorowaniem rzeczywistym układu pokoju, w przypadku którego wykonywano symulację, gdyż w tym miejscu zlokalizowany był w wybranym pomieszczeniu węzeł techniczno-sanitarny. Utworzony palnik obejmował całą powierzchnię blatu stolika równą 0,87 m², znajdującą się na wysokości 0,75 m od podłogi. Na podstawie informacji podanej w [15] wartość wydzielanego ciepła HRR na jednostkę powierzchni przyjęto na poziomie 500 kW/m². Zasadniczą częścią przeprowadzonych symulacji było sprawdzenie wpływu tworzenia się wybranych zagrożeń pożarowych na możliwość efektywnej ewakuacji w zależności od rodzaju spalanego materiału. Materiały użyte podczas badania zostały wybrane z biblioteki, którą udostępnia zastosowany program. Badaniom poddano następujące materiały często wykorzystywane w elementach wyposażenia wnętrz: nylon (poliamid); propylen; poliuretan; drewno sosnowe i drewno dębowe. Wykaz wykorzystanych materiałów i ich skład przedstawiono w tabeli 1, a bardziej szczegółowy opis można znaleźć w [16].

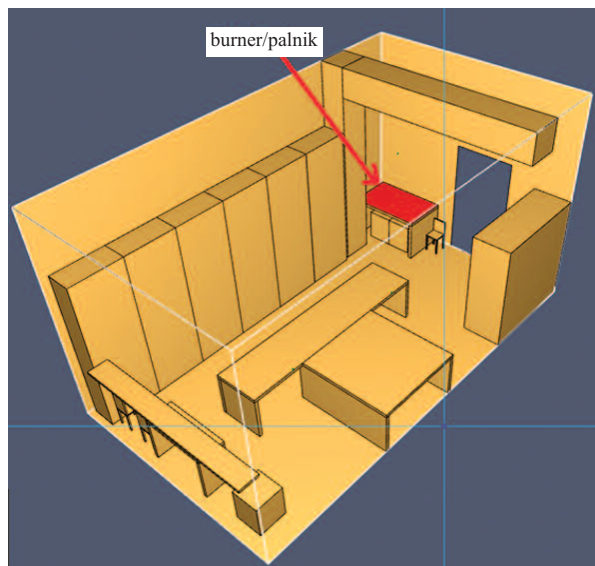


Fig. 3. The location of the burner symbolizing the initial surface in the selected room

Rys. 3. Lokalizacja palnika symbolizującego początkową powierzchnię w wybranym pomieszczeniu

Table 1. Selected types of flammable materials and their composition

Tabela 1. Wybrane rodzaje materiałów palnych i ich skład

Material/ Badany materiał	Fuel composition/Skład paliwa			
	carbon (C)/ węgiel (C)	hydrogen (H)/ wodór (H)	oxygen (O)/ tlen (O)	nitrogen (N)/ azot (N)
Nylon	1,0	1,8	0,17	0,17
Propylene/Propylen	3,0	6,0	0,0	0,0
Polyurethane/ Poliuretan	6,3	7,1	2,1	1,0
Pine wood/ Drewno sosnowe	1,0	1,7	0,83	0,0
Oak wood/ Drewno dębowe	1,0	1,7	0,72	1,0E-3

ability to continuously record multiple parameters within the computational mesh and define various devices from a range of available sensors, as well as systems that influence fire development, such as sprinklers. During simulation model execution, the following were implemented:

- a) 3D output volumes monitoring:
 - temperature values throughout the room;
 - visibility throughout the room;
- b) 2D result planes, 6 for each monitored parameter, monitoring:
 - temperature values in selected room sections;
 - visibility in selected room sections.

Five planes were spaced equidistantly along the Ox axis, while one plane was spaced along the Oy axis. This plane passes through the center of the burner surface and is parallel to the XZ plane of the global Cartesian coordinate system. Although the analyses provided results for each of the defined planes, the large number of results required selection. Therefore, it was arbitrarily decided to present results from the three planes most relevant to the evacuation process: one defined along the Oy axis, and two defined along the Ox axis, respectively, intersecting the center of the fire source and the areas where workers are located during work. These planes are shown in Figure 4 with red arrows. For research purposes, four temperature reading points (hereinafter referred to as thermocouples) were also defined. They were positioned as follows:

- a) thermocouples 1 and 2 – 1.75 m and 2.75 m above the center of the burner surface, respectively;
- b) thermocouples 3 and 4 – at a height of 1 m, in areas where employees are most frequently present at their workstations. Their locations in the computational domain are presented in Figure 5.

Research conducted using the PyroSim platform determined the effect of combustion of five selected materials on the rate of generation and spread of gaseous thermal decomposition products – smoke – as well as heat transfer within the room. All of these phenomena related to the formation and spread of the combustion zone undoubtedly impact the possibility of effective evacuation in fire conditions. For all tested materials,

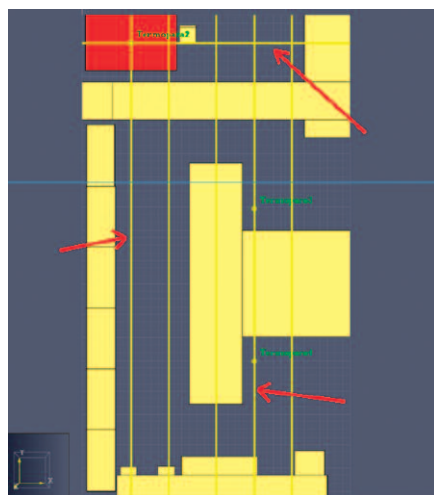


Fig. 4. Defined 2D result planes (red arrows show planes selected for analysis)

Rys. 4. Zdefiniowane płaszczyzny wynikowe 2D (strzałkami czerwonymi pokazano płaszczyzny wybrane do analizy)

Jedną z najważniejszych cech symulacji FDS jest możliwość ciągłej rejestracji wielu parametrów wewnątrz siatki obliczeniowej oraz definiowanie różnych urządzeń z palety dostępnych czujników, a także systemów mających wpływ na rozwój pożaru, np. tryskacze i zraszacze. W trakcie wykonywania modelu symulacyjnego zaimplementowane zostały:

- a) objętości wynikowe 3D monitorujące:
 - wartość temperatury w całym pomieszczeniu;
 - widoczność w całym pomieszczeniu;
- b) płaszczyzny wynikowe 2D, po 6 szt. w przypadku każdego dozorowanego parametru, monitorujące:
 - wartości temperatury w wybranych przekrojach pomieszczenia;
 - widoczność w wybranych przekrojach pomieszczenia.

Pięć płaszczyzn zostało rozmieszczonych w jednakowej odległości wzdłuż osi Ox, natomiast jedna płaszczyzna znalazła się wzdłuż osi Oy. Przechodzi ona przez punkt centralny powierzchni palnika i jest równoległa do płaszczyzny XZ globalnego kartezjańskiego układu współrzędnych. Wykonane analizy dostarczyły wyników dotyczących każdej z definiowanych płaszczyzn, ale duża liczba uzyskanych rezultatów wymagała selekcji. Zdecydowano się na wykorzystanie wyników z trzech płaszczyzn najbardziej istotnych z punktu widzenia procesu ewakuacji: jednej zdefiniowanej wzdłuż osi Oy przecinającej środek źródła pożaru oraz dwóch zdefiniowanych wzdłuż osi Ox przecinających miejsca, w których przebywają pracownicy podczas pracy. Płaszczyzny te zostały pokazane na rysunku 4 za pomocą czerwonych strzałek. Do celów badawczych zdefiniowano również 4 punkty odczytu temperatury (dalej nazywane termoparami). Ich rozmieszczenia dokonano w następujący sposób:

- a) termopary nr 1 i 2 – odpowiednio 1,75 m oraz 2,75 m nad punktem centralnym powierzchni palnika;
- b) termopary nr 3 i 4 – na wysokości 1 m w miejscach najczęstszego przebywania pracowników przy ich stanowiskach pracy. Lokalizację termopar w domenie obliczeniowej zaprezentowano na rysunku 5.

W ramach badań przeprowadzonych z wykorzystaniem platformy PyroSim określono wpływ spalania pięciu wybranych materiałów na szybkość powstawania i rozprzestrzeniania się gazowych produktów rozkładu termicznego (dymu) oraz wymianę ciepła w pomieszczeniu. Ogół tych zjawisk, związanych

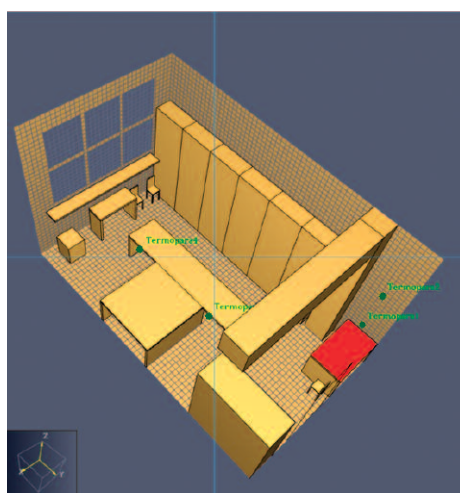


Fig. 5. Locations of thermocouple No 1, 2, 3 and 4 shown in the compartment model

Rys. 5. Rozmieszczenie termopar nr 1, 2, 3 i 4 pokazane na modelu pomieszczenia

a simulation duration of no more than 30 seconds was assumed. This limitation was based on test measurements of the time of organized and peaceful evacuation of the room, which lasted 1015 seconds. Analyses were presented for three selected simulation times: 10, 20, and 30 seconds of fire duration. This allowed for the observation of changes in smoke density over time, changes in room temperature, and the rate of heat release. Based on the available materials and numerical simulations, numerical analyses of the spread of gaseous thermal decomposition products (smoke) and temperature were performed.

Results

An important parameter that provides information about the size of a fire and its development is the heat release rate (HRR). Based on the results of each simulation study, graphs were created in an Excel spreadsheet illustrating the HRR fire load curve and the Q_{TOTAL} value, representing the total heat released over the entire 30-second simulation period. The HRR time histories for all analyzed materials are presented in Figure 6, while the corresponding Q_{TOTAL} heat release totals are presented in Figure 7. Another significant parameter influencing evacuation during a fire is the temperature at a selected point and/or throughout the entire computational domain. Example temperature distributions across the entire computational domain and in selected XZ and YZ planes at 30 seconds of simulation for nylon are shown in Figures 8 – 10, respectively. The temperature scale is color-coded from the lowest (20°C) in blue to the highest (red). Similar distributions were obtained for the other materials analyzed. Figures 11 – 14 show the temperature time histories obtained for all the analyzed combustible materials, corresponding to the points where thermocouples No. 1, 2, 3 and 4 were installed.

A significant parameter affecting evacuation during a fire, in addition to temperature, is smoke emission, which limits visibility. Figures 15-19 show smoke occupancy at 10, 20, and 30 seconds as a result of burning nylon (Figure 15), propylene (Figure 16), polyurethane (Figure 17), pine wood (Figure 18), and oak wood (Figure 19).

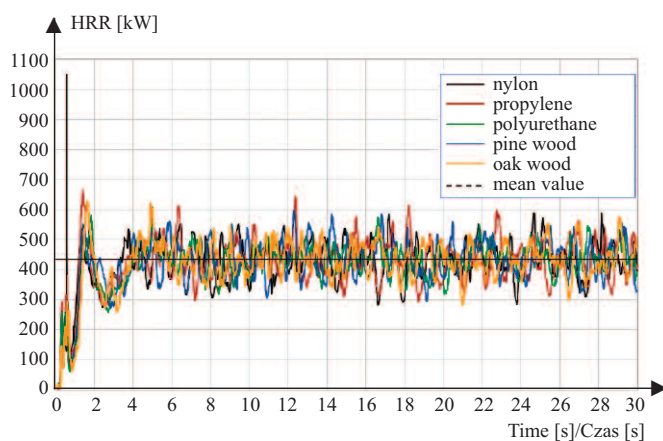


Fig. 6. HRR time histories obtained for all analyzed materials

Rys. 6. Przebiegi czasowe HRR otrzymane w przypadku wszystkich analizowanych materiałów

z tworzeniem się i rozprzestrzenianiem strefy spalania, wpływa niewątpliwie na możliwość efektywnej ewakuacji w warunkach pożaru. W przypadku wszystkich badanych materiałów przyjęto czas trwania symulacji na poziomie nieprzekraczającym 30 s. Takiego ograniczenia dokonano na podstawie testowych pomiarów czasu zorganizowanego i spokojnego opuszczenia pomieszczenia, które trwało 10 – 15 s. Analizy dotyczyły trzech wybranych czasów symulacji: 10; 20 i 30 s trwania pożaru. Pozwoliło to na zaobserwowanie zmiany zadymienia w czasie, zmiany temperatury w pomieszczeniu oraz szybkości wydzielania się ciepła. Na podstawie posiadanych materiałów oraz przeprowadzonych symulacji numerycznych wykonano analizy numeryczne rozprzestrzeniania się gazowych produktów rozkładu termicznego (dymu) oraz temperatury.

Wyniki

Istotnym parametrem, dostarczającym informacji o rozmiarze pożaru i jego rozwoju jest szybkość wydzielania ciepła (wartość HRR). Na podstawie wyników przeprowadzonych badań symulacyjnych, każdorazowo w arkuszu kalkulacyjnym Excel, opracowano wykresy obrazujące krzywą obciążenia ogniowego HRR oraz wielkość Q_{TOTAL} , przedstawiającą całkowitą sumę wydzielonego ciepła przez cały okres przebiegu symulacji trwający 30 s. Przebiegi czasowe HRR w przypadku wszystkich analizowanych materiałów przedstawiono na rysunku 6, natomiast odpowiadające im całkowite sumy wydzielonego ciepła Q_{TOTAL} na rysunku 7. Ważnym parametrem, mającym wpływ na przebieg ewakuacji podczas pożaru, jest również wartość temperatury w wybranym punkcie i/lub w całej objętości domeny obliczeniowej. Przykładowe rozkłady temperatury w całej objętości domeny obliczeniowej i w wybranych płaszczyznach XZ i YZ w 30 s symulacji, w przypadku nylonu pokazano odpowiednio na rysunkach 8 – 10. Skalę temperatury oznaczono kolorami od najniższej (20°C) w kolorze niebieskim do najwyższej w kolorze czerwonym. Analogiczne rozkłady otrzymano w przypadku pozostałych analizowanych materiałów. Na rysunkach 11 – 14 pokazano natomiast przebiegi

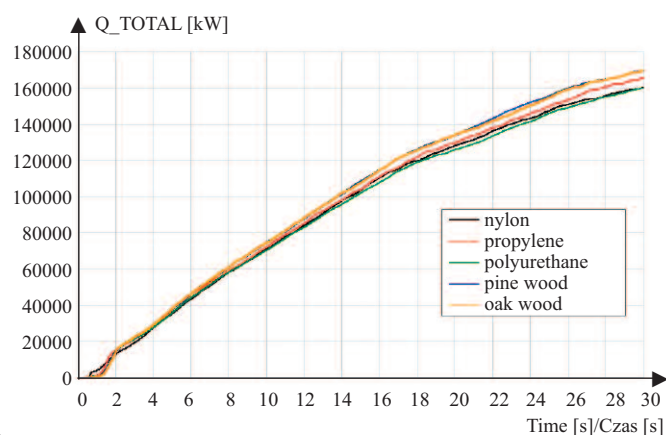


Fig. 7. Time histories of total heat Q_{TOTAL} in the range of 0-30 s obtained for all analyzed materials

Rys. 7. Przebiegi czasowe całkowitego wydzielonego ciepła Q_{TOTAL} w przedziale 0-30 s otrzymane w przypadku wszystkich analizowanych materiałów

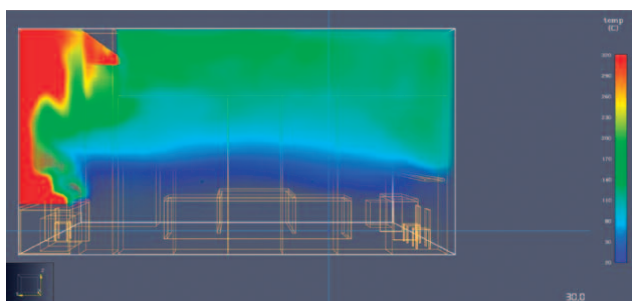


Fig. 8. Temperature distribution in the entire computational domain during nylon combustion at 30 seconds of simulation

Rys. 8. Rozkład temperatury w całej objętości domeny obliczeniowej podczas spalania nylonu w 30 s symulacji

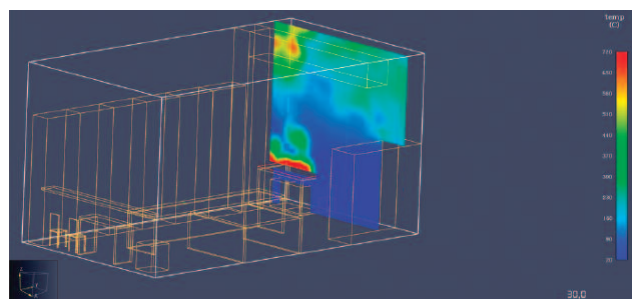


Fig. 9. Temperature distribution in the XZ plane during nylon combustion at 30 seconds of simulation

Rys. 9. Rozkład temperatury w płaszczyźnie XZ podczas spalania nylonu w 30 s symulacji

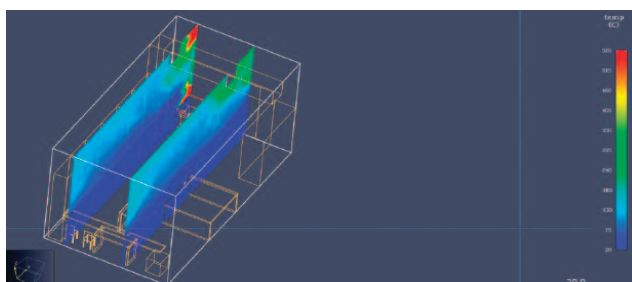


Fig. 10. Temperature distribution in two YZ planes during nylon combustion at 30 seconds of simulation

Rys. 10. Rozkład temperatury w dwóch płaszczyznach YZ podczas spalania nylonu w 30 s symulacji

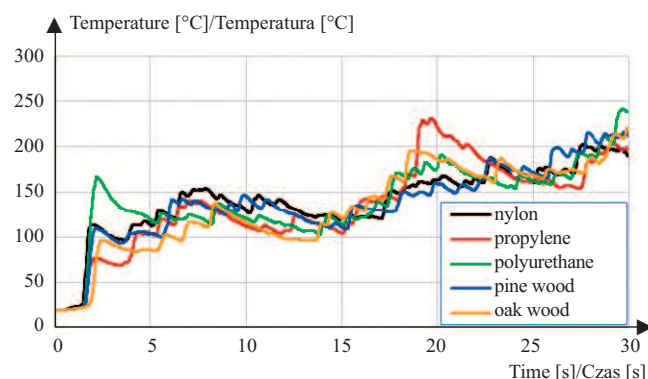


Fig. 11. Temperature time histories obtained for thermocouple No. 1 during combustion of nylon, propylene, polyurethane, as well as pine and oak wood

Rys. 11. Przebiegi czasowe temperatury otrzymane w przypadku termopary nr 1, otrzymane podczas spalania nylonu, propylenu, poliuretanu oraz drewna sosnowego i dębowego

gi czasowe temperatury dotyczące wszystkich analizowanych materiałów palnych odpowiadające punktom, w którym zamontowano termopary nr 1, 2, 3 i 4.

Ważnym parametrem mającym wpływ na przebieg ewakuacji podczas pożaru, oprócz temperatury, jest wydzielający się dym, który ogranicza zakres widzialności. Na fotografiach 1 ÷ 5 pokazano zadymienie pomieszczenia w 10, 20 i 30 s w wyniku spalania nylonu, propylenu, poliuretanu, drewna sosnowego i drewna dębowego.

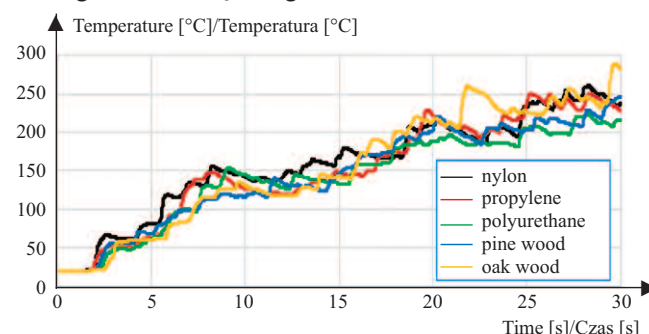


Fig. 12. Temperature time histories obtained for thermocouple No. 2 during combustion of nylon, propylene, polyurethane, as well as pine and oak wood

Rys. 12. Przebiegi czasowe temperatury otrzymane w przypadku termopary nr 2 otrzymane podczas spalania nylonu, propylenu, poliuretanu oraz drewna sosnowego i dębowego

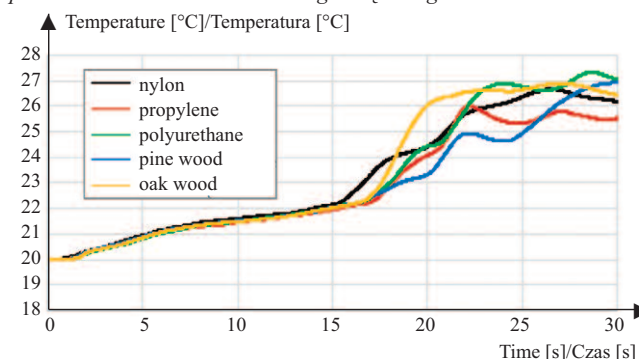


Fig. 13. Temperature time histories obtained for thermocouple No. 3 during combustion of nylon, propylene, polyurethane, as well as pine and oak wood

Rys. 13. Przebiegi czasowe temperatury otrzymane w przypadku termopary nr 3 otrzymane podczas spalania nylonu, propylenu, poliuretanu oraz drewna sosnowego i dębowego

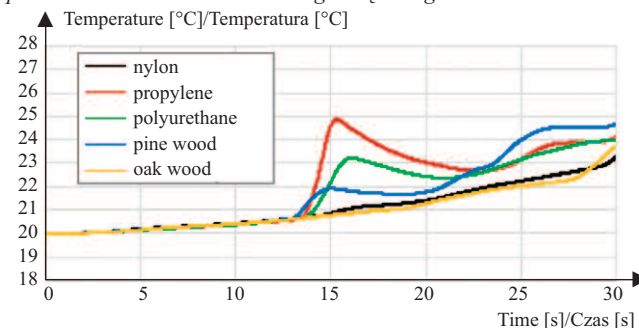


Fig. 14. Temperature time histories obtained for thermocouple No. 4 during combustion of nylon, propylene, polyurethane, as well as pine and oak wood

Rys. 14. Przebiegi czasowe temperatury otrzymane w przypadku termopary nr 4 otrzymane podczas spalania nylonu, propylenu, poliuretanu oraz drewna sosnowego i dębowego

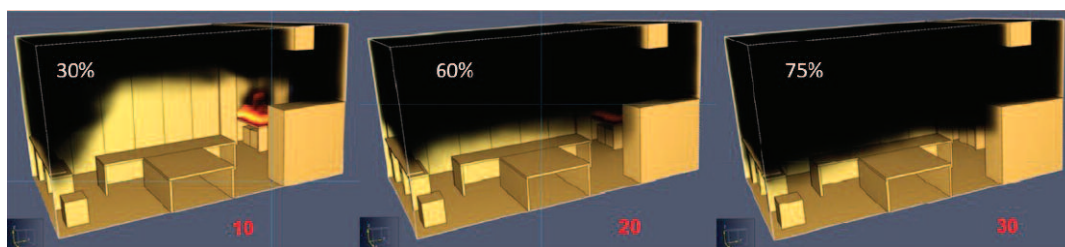


Photo 1. Smoke in the room at 10, 20 and 30 seconds as a result of burning nylon

Fot. 1. Zadymienie pomieszczenia w 10, 20 i 30 sekundzie w wyniku spalania nylonu

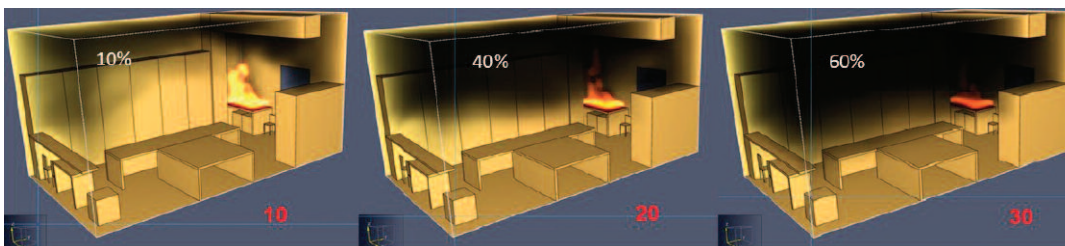
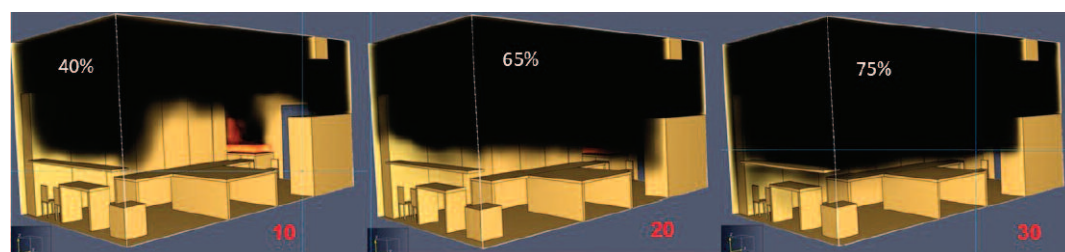


Photo 2. Smoke in the room at 10, 20 and 30 seconds as a result of burning propylene

Fot. 2. Zadymienie pomieszczenia w 10, 20 i 30 s w wyniku spalania propylenu



Fot. 3. Smoke in the room at 10, 20 and 30 seconds as a result of burning polyurethane

Fot. 3. Zadymienie pomieszczenia w 10, 20 i 30 s w wyniku spalania poliuretanu

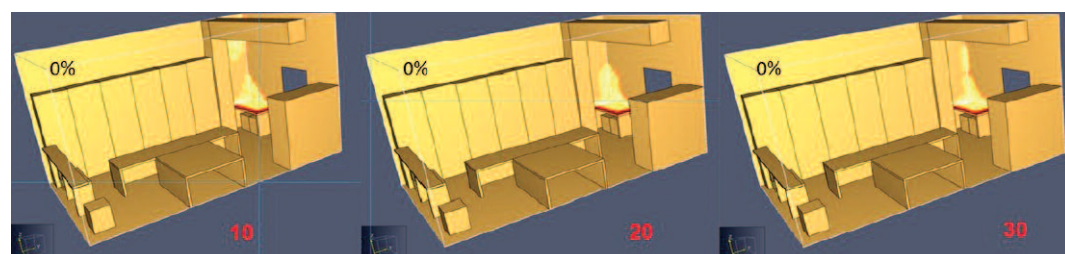


Photo 4. Smoke in the room at 10, 20 and 30 seconds as a result of burning pine wood

Fot. 4. Zadymienie pomieszczenia w 10, 20 i 30 s w wyniku spalania drewna sosnowego

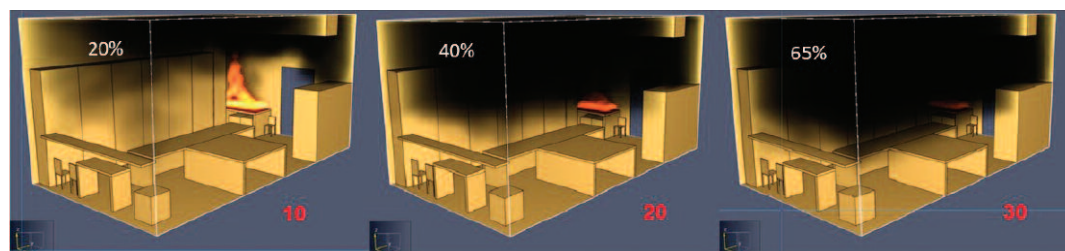


Photo 5. Smoke in the room at 10, 20 and 30 seconds as a result of burning oak wood

Fot. 5. Zadymienie pomieszczenia w 10, 20 i 30 s w wyniku spalania drewna dębowego

Discussion

Table 2 presents selected parameters related to the rate (HRR) and the total sum of released heat (Q_{TOTAL}), while Table 3 presents parameters related to the values of temperature and smoke obtained during the combustion of selected combustible materials. The heat release rate

Omówienie wyników

W tabeli 2 zestawiono wybrane parametry związane z szybkością (HRR) i całkowitą sumą wydzielonego ciepła (Q_{TOTAL}), natomiast w tabeli 3 parametry związane z wartościami temperatury i zadymienia otrzymanymi podczas spalania wybranych materiałów palnych. Kształt przebiegu szybkości wy-

Table 2. Parameters related to the heat release rate HRR and total released heat (Q_{TOTAL}) obtained during combustion simulation tests of various combustible materials

Tabela 2. Parametry związane z szybkością wydzielania ciepła HRR i całkowitym wydzielonym ciepłem (Q_{TOTAL}) otrzymane podczas badań symulacyjnych spalania różnych materiałów palnych

Material/Material palny	Maximum of HRR/Maksymalne HRR		Range of HRR [kW]/Zakres zmian HRR [kW]		Total released heat [kW]/Całkowita ilość wydzielonego ciepła [kW]
	time [s]/czas [s]	value [kW]/wartość [kW]	min	max	
Nylon	0,6	815	280	590	160 375
Propylene/Propylen	1,5	666	295	640	165 528
Polyurethane/Poliuretan	5,0	606	255	605	159 994
Pine wood/Drewno sosnowe	12,3	595	270	595	169 525
Oak wood/Drewno dębowe	1,6	628	260	618	169 779

Table 3. Parameters related to the maximum values of temperature and smoke obtained during simulation tests of combustion of various flammable materials

Tabela 3. Parametry związane z maksymalną wartością temperatury i zadymieniem otrzymane podczas badań symulacyjnych spalania różnych materiałów palnych

Material/Material palny	Maximum temperature [°C]/Maksymalna temperatura [°C]		Maximum temperature indicated by thermocouples [°C]/Maksymalna temperatura zarejestrowana przez termopary [°C]				Percentage of room smoke/Procent zadymienia pomieszczenia		
	above the fireplace/nad paleniskiem	in the ceiling layer/w warstwie podsufitowej	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 4	po 10 s	po 20 s	po 30 s
Nylon	720	650	201	260	27	23	30	60	75
Propylene/Propylen	770	600	230	250	26	25	10	40	60
Polyurethane/Poliuretan	720	580	240	223	27	24	40	65	75
Pine wood/Drewno sosnowe	720	650	216	246	27	25	0	0	0
Oak wood/Drewno dębowe	720	650	220	288	27	24	20	600	65

(HRR) curve during combustion of all analyzed materials was oscillatory (Figure 6).

The maximum HRR value of 815 kW was obtained in less than a second during the combustion of nylon, while the lowest value of 595 kW was obtained only after more than 12 seconds during the combustion of pine wood (Table 2). For a fully developed flame, the HRR value varied around a mean of 435 kW within the following range:

- from 280 kW to 590 kW for nylon;
- from 295 kW to 640 kW for propylene;
- from 255 kW to 605 kW for polyurethane;
- from 270 kW to 595 kW for pine wood;
- from 260 kW to 618 kW for oak wood.

The maximum total heat generated per unit time was 169,779 kW for oak wood, and the lowest was 159,994 kW for polyurethane (Table 2). For the remaining materials, these values were 160,375 kW for nylon, 165,528 kW for propylene, and 169,525 kW for pine wood. Analysis of the temperature curves for all five tested materials shows that they are similar. In each case, the highest temperatures were recorded above the fireplace, near the wall, and in the corner of the room in the ceiling layer (between the supporting beam, column, and side wall). The temperatures at these points after 30 seconds of simulation reached the following values:

- above the combustion chamber – approximately 770°C for propylene and approximately 720°C for nylon, polyurethane, pine and oak wood;

dzielenia ciepła HRR podczas spalania wszystkich analizowanych materiałów miał charakter oscylacyjny (rysunek 6).

Maksymalną wartość HRR równą 815 kW osiągnięto w czasie niecałej sekundy podczas spalania nylonu, natomiast najmniejszą 595 kW otrzymano dopiero po ponad 12 s podczas spalania drewna sosnowego (tabela 2). Dla w pełni rozwiniętego płomienia wartość HRR zmieniała się wokół średniej 435 kW w następującym zakresie:

- od 280 kW do 590 kW w przypadku nylonu;
- od 295 kW do 640 kW w przypadku propylenu;
- od 255 kW do 605 kW w przypadku poliuretanu;
- od 270 kW do 595 kW w przypadku drewna sosnowego;
- od 260 kW do 618 kW w przypadku drewna dębowego.

Maksymalną ilość całkowitego ciepła wytworzonego w jednostce czasu równą 169 779 kW otrzymano w przypadku spalania drewna dębowego, a najmniejszą 159 994 kW w przypadku spalania poliuretanu (tabela 2). W przypadku pozostałych materiałów wartości te wynosiły: 160 375 kW dla nylonu; 165 528 kW dla propylenu i 169 525 kW dla drewna sosnowego. Na podstawie analizy otrzymanych przebiegów temperatury wszystkich pięciu badanych materiałów stwierdzono, że są one do siebie zbliżone. Każdorazowo, największe wartości temperatury odnotowano nad paleniskiem, przy ścianie oraz w narożniku pomieszczenia w warstwie podsufitowej (pomiędzy belką nośną, słupem i ścianą boczną). Temperatura w tych punktach osiągnęła następujące wartości po 30 s symulacji:

b) in the ceiling layer – approximately 650°C for nylon, pine and oak wood, approximately 600°C for propylene, and approximately 580°C for polyurethane.

Significantly lower temperature values were recorded in the rest of the analyzed room. It was noted that the structural obstacle in the room, in the form of a column and a supporting beam, restricted the flow of combustion products. During combustion of each tested material, virtually identical temperature distribution values were observed. The temperature in the ceiling layer after 30 seconds of simulation oscillated around 140°C (30 s), in the immediate vicinity of the door (at eye level – approximately 1.7 m) it was approximately 90°C, and at mid-height it reached approximately 25°C. This is confirmed by the readings of thermocouples 1 and 2, which were placed directly next to the fireplace at heights of 1.75 m and 2.75 m, and thermocouples 3 and 4, which were placed at a height of 1 m near the workstation (desk) (Figures 11 – 14). The maximum values recorded by the first two thermocouples ranged from 200 – 300°C, while the remaining readings did not exceed 27°C (Table 3). These results support the practical conclusion **that evacuation from a room in the event of combustion of the above-mentioned materials should be conducted in a bent-over position to avoid the negative effects of elevated temperatures on the evacuee's body.** High temperatures and the effects of heat can pose a threat to humans, leading to body temperature disturbances. Temperature increases to 39°C can lead to sudden loss of consciousness. Flames and their radiative effects, as well as excessively heated surfaces, can lead to severe burns, which can be local or systemic and depend on the temperature and duration of exposure to the thermal stimulus [5].

Simulations of the thermal decomposition of the five materials tested indicate, in most cases, a rapid increase in smoke emission, accompanied by a sudden decrease in air transparency (Photos 1 ÷ 5). The exception is the burning of pine wood, which produces virtually no smoke, and the visibility range remains unchanged at 30 meters. Simulation studies have shown that the highest smoke levels occurred during the burning of polyurethane and nylon. For these two materials, full smoke coverage of the ceiling zone occurred within 10 seconds. By 30 seconds, smoke had covered over 70% of the room volume. Relatively high smoke levels can also be observed during the burning of oak wood, where after 30 seconds, smoke covers over 60% of the room, and slightly lower levels during the burning of propylene, where after 30 seconds, smoke covers approximately 50% of the room. Such rapid smoke saturation in such a short period undoubtedly complicates the process of a quick and effective evacuation. In both cases, visibility at the door during the 30-second test period is comparable, ranging from 1 m to approximately 3 m.

Based on the obtained smoke distributions, it can be concluded that after approximately 20 seconds, the smoke hazard forces the evacuating worker to adopt a specific, crouching posture, with the degree of torso bending and leg flexion depending on the time elapsed since the start of

a) nad paleniskiem – ok. 770°C w przypadku propylenu i ok. 720°C w przypadku nylonu, poliuretanu oraz drewna sosnowego i dębowego;

b) w warstwie podsufitowej – ok. 650°C w przypadku nylonu, drewna sosnowego i dębowego oraz ok. 600°C w przypadku propylenu i ok. 580°C poliuretanu.

Znacznie mniejsze wartości temperatury zarejestrowano w pozostałej części analizowanego pomieszczenia. Zauważono, że występująca w pokoju przeszkoda konstrukcyjna, w postaci słupa oraz belki nośnej, stanowiła ograniczenie przepływu produktów spalania. Podczas spalania każdego badanego materiału odnotowano praktycznie identyczne wartości rozkładu temperatury, która w warstwie podsufitowej wynosiła po 30 s symulacji ok. 140°C, w bezpośredniej bliskości drzwi (na wysokości wzroku – ok. 1,7 m) – 90°C, a w połowie tej wysokości osiągała poziom ok. 25°C. Potwierdzają to wskazania termopar nr 1 i 2, które zostały umieszczone w bezpośredniej bliskości paleniska na wysokości 1,75 i 2,75 m oraz termopar nr 3 i 4 znajdujących się na wysokości 1 m w pobliżu miejsca pracy (biurka) (rysunki 11 – 14). Maksymalne wartości zarejestrowane przez pierwsze dwie termopary mieściły się w zakresie od 200 – 300°C, natomiast wskazania pozostałych nie przekroczyły 27°C (tabela 3). Wyniki te dają podstawę do sformułowania praktycznego wniosku, że **ewakuację z pomieszczenia w przypadku spalania wymienionych materiałów należy prowadzić w pozycji pochylonej,** aby nie narazić osoby ewakuującej się na negatywne oddziaływanie podwyższonej temperatury. Wysoka temperatura oraz oddziaływanie ciepła może być bowiem zagrożeniem dla człowieka, doprowadzając do zaburzeń temperatury ciała. Jej zwiększenie do 39°C może doprowadzić do nagłej utraty przytomności. Płomienie i jego radiacyjne oddziaływanie, a także nadmiernie rozgrzane powierzchnie to przyczyny ciężkich oparzeń, które mogą być miejscowe lub ogólnoustrojowe i uzależnione są od wartości temperatury oraz czasu oddziaływania bodźca termicznego na organizm [5].

Przeprowadzone symulacje rozkładu termicznego badanych pięciu materiałów wskazują w większości przypadków na szybki wzrost wydzielania się dymu, przy jednoczesnym gwałtownym spadku przejrzystości powietrza (fotografie 1 ÷ 5). Wyjątek stanowi spalanie drewna sosnowego, podczas którego praktycznie nie występuje zadymienie, a zakres widzialności utrzymywał się na niezmiennym poziomie równym 30 m. Przeprowadzone badania symulacyjne wykazały, że największe zadymienie wystąpiło w procesie spalania poliuretanu oraz nylonu. W przypadku tych dwóch materiałów już w 10 s wystąpiło pełne zadymienie strefy podsufitowej, natomiast w 30 s dym obejmował ponad 70% kubatury pomieszczenia. Dostatecznie duże zadymienie można zaobserwować również podczas spalania drewna dębowego, gdzie po 30 s objęło ono ponad 60% pomieszczenia i nieco mniejsze w przypadku spalania propylenu, podczas którego po 30 s zadymienie objęło ok. 50% pomieszczenia. Takie gwałtowne nasycenie dymu, w tak krótkim czasie utrudnia niewątpliwie proces szybkiej i efektywnej ewakuacji. W obu przypadkach widoczność przy drzwiach w 30 s badania jest na porównywalnym poziomie i waha się od 1 m do ok. 3 m.

the numerical simulation and the location in the room during evacuation. It is worth noting that the flammability of the above-mentioned materials was tested in laboratory conditions. Their smoke generation only determines the behavior of these materials and their properties under specific conventional conditions of thermal decomposition and combustion, not their behavior and properties under actual fire conditions. This does not mean that the obtained indicators have no practical application. Proper interpretation of the values of the determined parameters is necessary. This intensity of fire smoke emission almost completely limits visibility, often leading to loss of orientation and the ability to move in the desired direction in real fire conditions. These conditions negatively impact fire safety, particularly the course and time of evacuation, which requires special procedures:

- a) when in a heavily smoke-filled room, assume a crouched position, as close to the floor as possible;
- b) protect your airway, e.g., with a cloth soaked in water;
- c) in a smoke-filled room, you should also move along the walls to avoid losing your orientation and, if possible, move away from the source of combustion.

Summary and conclusions

The aim of the simulations was to assess the effects of combustion of selected materials on the possibility of effective evacuation in fire conditions using the PyroSim platform. A technical drawing of the actual room was created using SolidWorks, which was used to create a geometric model in PyroSim for the research phase. Five different materials were tested: nylon, propylene, polyurethane, pine and oak wood. Particular attention was paid to smoke propagation, temperature rise, and the associated evacuation risks. The results were analyzed, and based on this, it can be concluded that the stated goal was achieved.

Based on literature data and analysis of the simulation results, the following general conclusions were formulated:

- 1) the greatest risk to occupants of a room engulfed in fire is posed by the central area of the fire and the walls, ceilings, and corners of the room located immediately adjacent to it;
- 2) the greatest amount of heat was released during the assumed simulation time of 30 seconds during the oak wood fire, and the lowest during the polyurethane combustion;
- 3) the fastest increase in smoke density was observed during the polyurethane combustion. A slightly slower increase was observed during the nylon and oak combustion. In practice, in these cases, after approximately 20 seconds, smoke covered more than half of the room, starting from the ceiling, and after 30 seconds, over 75% of its volume. No smoke was observed during the pine wood combustion;
- 4) considering the recorded temperature distribution in the room and its smoke density (with the exception of the pine wood), it can be concluded that safe evacuation is only

Na podstawie otrzymanych rozkładów zadymienia stwierdzono, że po ok. 20 s zagrożenie w postaci dymu wymusza przyjęcie określonej, schylonej postawy pracownika ewakuującego się, przy czym poziom pochylenia tułowia i ugięcia nóg zależy od czasu, jaki upłynął od początku symulacji numerycznej i od miejsca znajdowania się w pomieszczeniu podczas ewakuacji. Warto zauważyć, że badając stopień palności materiałów w warunkach laboratoryjnych, ich dymotwórczość określa jedynie zachowanie i właściwości w konkretnych umownych warunkach rozkładu termicznego i spalania, a nie ich zachowanie i ich właściwości w warunkach rzeczywistego pożaru. Nie oznacza to, że uzyskane wskaźniki nie mają praktycznego zastosowania. Konieczna jest właściwa interpretacja wartości wyznaczanych parametrów. Uzyskana intensywność emisji dymu pożarowego ogranicza widoczność w sposób prawie całkowity, doprowadzając w rzeczywistych warunkach pożarowych często do utraty orientacji i możliwości poruszania się w żądanym kierunku. Uwarunkowania te wpływają negatywnie na bezpieczeństwo pożarowe, a szczególnie na przebieg i czas ewakuacji, co wymaga podejmowania szczególnych zasad postępowania:

- a) znajdując się w pomieszczeniu silnie zadymionym, należy przyjąć pochyloną pozycję, jak najbliżej podłogi;
- b) drogi oddechowe trzeba zabezpieczyć, np. zmoczoną w wodzie materią;
- c) w zadymionym pomieszczeniu należy poruszać się wzdłuż ścian, aby nie stracić orientacji oraz jeśli to możliwe z dala od źródła spalania.

Podsumowanie i wnioski

Celem przeprowadzonych symulacji była ocena skutków spalania wybranych materiałów, z wykorzystaniem platformy PyroSim, na możliwość efektywnej ewakuacji w warunkach pożaru. Za pomocą programu SolidWorks wykonano rysunek techniczny rzeczywistego pomieszczenia, na podstawie którego został stworzony jego model geometryczny w programie PyroSim, który wykorzystano w części badawczej. Badaniom poddano pięć różnych materiałów: nylon; drewno sosny; propylen; poliuretan; drewno dębu. Zwrócono szczególną uwagę na rozprzestrzenianie się dymu, wzrost temperatury i związane z tym zagrożenia dotyczące ewakuacji. Przeprowadzono analizę otrzymanych wyników i na tej podstawie stwierdzono, że postawiony cel został zrealizowany. Na podstawie danych literaturowych oraz analizy wyników przeprowadzonych badań symulacyjnych sformułowano następujące wnioski:

- 1) największe zagrożenie dla osób przebywających w pomieszczeniu objętym pożarem stanowi centralny obszar paleniska oraz ściany, sufit i narożniki pomieszczenia znajdujące się w jego bezpośrednim sąsiedztwie;
- 2) największa ilość ciepła w założonym czasie symulacji równym 30 s została wydzielona podczas pożaru drewna dębowego, a najmniejsza podczas spalania poliuretanu;
- 3) najszybszy wzrost gęstości dymu otrzymano w przypadku spalania poliuretanu, a nieco wolniejszy podczas spalania nylonu i drewna dębowego. Praktycznie w tych przypadkach po ok. 20 s zadymienie objęło ponad połowę pomieszczenia po-

possible for the first 10 seconds. After this time, safe evacuation can only be achieved by leaning forward with bent legs. As time passes, a position closer to the floor should be adopted.

The prepared geometric model can be expanded in the future to include new devices, such as ventilation, smoke detectors, and sprinklers, to minimize the risks associated with the spread of smoke and fire. It would also be beneficial to use this model for educational or training purposes. Simulations enable effective application of theoretical knowledge in practice by properly deploying these safety features.

Received: 08.07.2025

Revised: 25.08.2025

Published: 23.10.2025

cząwszy od sufitu, a po 30 s ponad 75% jego kubatury. Podczas spalania drewna sosnowego nie zaobserwowano zadymienia;

4) biorąc pod uwagę zarejestrowany rozkład temperatury w pomieszczeniu oraz jego zadymienie (z wyjątkiem drewna sosnowego) stwierdzono, że bezpieczna ewakuacja jest możliwa tylko przez pierwsze 10 s. Po tym czasie bezpieczna ewakuacja może być prowadzona jedynie w pozycji pochylonej z ugiętymi nogami. Wraz z upływem czasu należy przyjmować pozycję bliższą podłogi.

Przygotowany model geometryczny może być w przyszłości rozbudowany o nowe urządzenia uwzględniające np. wentylację, czujniki dymu oraz tryskacze w celu zminimalizowania zagrożeń związanych z rozprzestrzenianiem się dymu i ognia. Celowe byłoby wykorzystanie tego modelu także w celach edukacyjnych lub ćwiczeniowych. Symulacje dają bowiem możliwość efektywnego wykorzystania wiedzy teoretycznej w praktyce dzięki właściwemu rozmieszczeniu zabezpieczeń.

Artykuł wpłynął do redakcji: 08.07.2025 r.

Otrzymało poprawiony po recenzjach: 25.08.2025 r.

Opublikowano: 23.10.2025 r.

Literature

[1] Krakowiak M, Bajor T, Rydz D. Bezpieczeństwo przeciwpożarowe w budynkach wielokondygnacyjnych, Inżynieria bezpieczeństwa a zagrożenia cywilizacyjne. Zmienność zagrożeń a innowacje w ratownictwie, (red.) Gil A., Nowacka U., Chmiel M., Centralna Szkoła Państwowej Straży Pożarnej w Częstochowie, Częstochowa, 2014.

[2] Małozieć D, Koniuch A. Proces spalania a pożar, Szkolenie Strażaków Ratowników cz. 1, CNBOP, s. 98-99, 2009.

[3] Konecki M. Wpływ szybkości wydzielania ciepła i emisji dymu na rozwój pożaru w układzie pomieszczeń, Wydawnictwo SGSP, Warszawa, s. 258, 2007.

[4] Bielecki P. Taktyka działań gaśniczych, Fundacja Edukacja i Technika Ratownictwa, Warszawa, 2004.

[5] Guzewski P, Wróblewski D, Małozieć D. Czynniki narażenia podczas pożarów, Czerwona księga pożarów, CNBOP-PIB, Józefów, tom I, s. 277-290, 2016.

[6] Smardz P, Paliszek-Saładyna J. Zalecenia dotyczące prawidłowego stosowania modelu CFD w symulacjach pożarowych dla programu fire dynamics symulator https://www.inbepo.pl/wp-content/uploads/2008/07/CFD_zasady_modelowania.pdf, 2008- [dostęp 25.09.2021],

[7] Wendt JW. Obliczeniowa dynamika płynów, Springer, Berlin, Heidelberg, <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-540-85056-4.pdf>, 2009.

[8] Pawlucy M, Kryś M. CFD dla inżynierów praktyczne ćwiczenia na przykładzie systemu ANSYS Fluent, Helion, Gliwice, 2020.

[9] Chybowski R, Konecki M, Tuśnio N. Wykorzystanie programu komputerowego FDS do modelowania pożaru w tunelu kablowym, Przegląd Elektrotechniczny – konferencje, ISSN 1731 – 6106, vol. 3, 2007.

[10] <https://pyrosim.pl/dokumentacja-pyrosim-i-pathfinder/>, <https://pyrosim.pl/program-pyrosim/>, <https://pyrosim.pl/instalacje-gasnicze/>, <https://pyrosim.pl/ogrzewnictwo/>, <https://pyrosim.pl/wentylacja-pozarowa/> [dostęp 24.09.2024].

[11] STIGO Sp. z o.o. Sp.k. PyroSim Instrukcja obsługi, ver. 2011.1, http://ktcad.nazwa.pl/pliki_do_pobrania/pliki_ze_strony_PyroSim/PyroSim_Instrukcja_obsługi_PL.pdf, 2011.

[12] Prauzner T. Wizualizacja zagrożeń na podstawie oprogramowania komputerowego PyroSim, Trendy wezdzdelavani 2014, Informacni a komunikacni technologie wezdzdelavani, s. 256-259, 2014.

[13] Kostrzewa S. Zastosowanie zaawansowanych metod inżynierskich w procesie projektowania bezpieczeństwa pożarowego obiektów na przykładzie programu PyroSim, AJD, 2015.

[14] Prauzner T, Kostrzewa S. Analiza porównawcza wyników badań opartych na symulacji pożaru w programie PyroSim, prace naukowe, Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie, Technika, Informatyka, Inżynieria Bezpieczeństwa, t. VI, s. 383–397, 2018.

[15] Jasztal M, Jaskółowski W, Omen Ł, Kowalski M. Badania bezpieczeństwa infrastruktury krytycznej w warunkach oddziaływania pożaru, sprawozdanie z realizacji pracy badawczej UGB 22-771, Warszawa, 2020.

[14] Hurley M. J., SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Springer, New York, 2016.