

mł. kpt. inż. Łukasz BUŁAŚ
Jednostka Ratowniczo-Gaśnicza nr 3
Komenda Miejska PSP we Wrocławiu
kpt. dr inż. Janusz Adam WRZESIŃSKI
Ośrodek Szkolenia
Komenda Wojewódzka PSP we Wrocławiu

Zastosowanie numerycznej symulacji komputerowej rozwoju pożaru dla celów operacyjno-szkoleniowych służb ratowniczych

Omówienie
LEAD

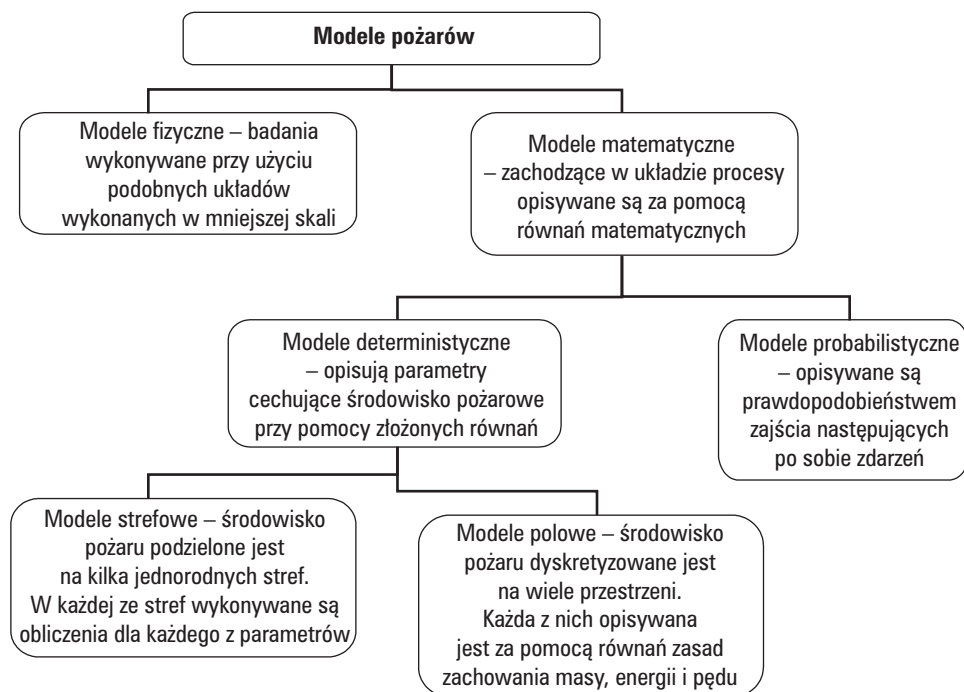
Komputerowe symulacje numeryczne są dość powszechną metodą badawczą oraz środkiem dydaktycznym wykorzystywanym podczas realizacji szkoleń i pokazów. Problemy realizacji rzeczywistych symulacji implikuje rozwój metod numerycznych pozwalających w zadowalający sposób zaprezentować stan techniczny urządzeń i procesów oraz rozwój prognozowanych zagrożeń dla badanych, symulowanych obiektów. W pracy przedstawiono realizację symulacji numerycznej dla zadanego obiektu budowlanego. Dodatkowo przeanalizowano możliwości obliczeniowo-symulacyjne wybranych aplikacji komputerowych dla zadanych warunków brzegowych realizowanych symulacji.

Słowa kluczowe: symulacja pożarowa, szkolenie strażaków, pożar budynku.

1. Aplikacje numeryczne stosowane w symulacji rozwoju pożaru

1.1. Wprowadzenie

Modelowanie zjawisk fizykochemicznych, w tym zjawisk szczególnych, takich jak pożar, jest metodą reprezentacji i opisu charakteru oraz złożoności zjawisk występujących w środowisku pożaru. Proces realizowany jest przez zastosowanie wielu niezależnych i złożonych modeli matematycznych charakteryzowanych danymi wejściowymi, warunkami brzegowymi oraz oczekiwanymi danymi wyjściowymi.



Rys. 1.1-a. Podział modeli pożarów

Źródło: opracowanie własne na podstawie [5].

1.2. Aplikacja komputerowa POŻARW

Aplikacja nie posiada interfejsu graficznego (GUI), wprowadzanie danych wejściowych odbywa się tylko w trybie tekstowym. Realizowana symulacja uwzględnia szybkość zmian powierzchni pożaru i wymianę ciepła z konstrukcjami budynku oraz badanie pożaru w szerokim zakresie rodzajów i konstrukcji budynków. Struktura programu pozwala badać parametry pożaru zarówno w budynkach wielokondygnacyjnych, jednokondygnacyjnych, wielopomieszczeniowych, jak i w pojedynczym pomieszczeniu dla warunków spalania płomieniowego o dowolnej lokalizacji ogniska pożaru. Równania matematyczne warstwowego modelu pożaru uwzględniają wymuszoną wentylację realizowaną w gorącej lub chłodnej warstwie, co pozwala na szacowanie zmienności badanego procesu. Proces obliczeniowy pozwala na określenie podstawowego parametru pożaru – temperatury warstwy gorącej T_h w funkcji czasu τ podczas pożaru w budynkach wielokondygnacyjnych. Parametr ten określa też minimalny czas oddziaływania gazów pożarowych na drogi ewakuacyjne.

1.3. Aplikacja komputerowa CFAST

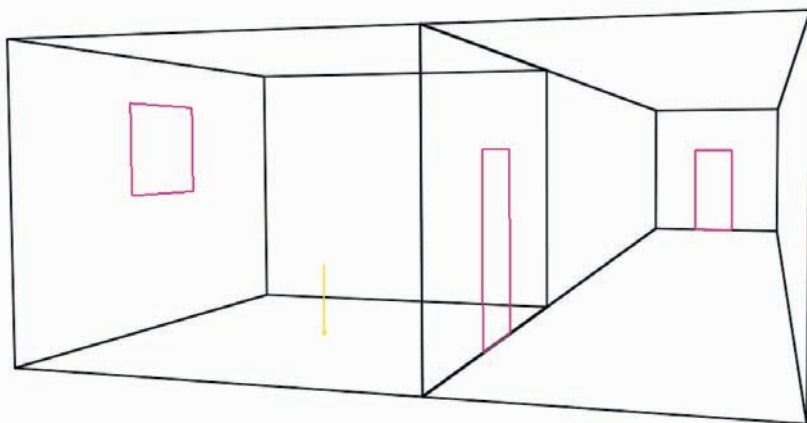
Aplikacja stosowana jest do obliczeń generowania i rozkładu gazów pożarowych, w tym temperatury pomieszczeń budynku podczas rozwoju pożaru. Bada-

na przestrzeń zawiera się w granicach kubatury od 1 m^3 do 1000 m^3 [3]. Równania modelu stosowane w programie CFAST mają formę matematycznych równań różniczkowych opisujących zasady zachowania masy, energii (pierwsze prawo termodynamiki), prawo gazu doskonałego oraz stosunki gęstości i energii wewnętrznej. Wynikami obliczeń są parametry, takie jak: ciśnienie, wysokość warstwy i temperatura zakumulowanych mas w funkcji czasu oraz całkowita entalpia dwóch warstw.

Aplikacja posiada zaimplementowaną bazę danych zawierającą materiały i obiekty palne mogące wystąpić w środowisku pożaru. Wszystkie rekordy bazy danych można edytować, istnieje także możliwość dodawania nowych obiektów. Aplikacja pozwala na realizację prognozy maksymalnie w 30 pomieszczeniach. Użytkownik może predefiniować pionową, poziomą i mechaniczną wentylację. Danymi wyjściowymi programu są:

- temperatura warstw (górnej i dolnej),
- temperatura przegród budowlanych,
- stężenie poszczególnych produktów spalania w warstwie,
- temperatura obiektów,
- czas aktywacji tryskaczy,
- szybkość wydzielania ciepła.

Po przeprowadzonych obliczeniach wyniki symulacji mogą być przedstawione w podprogramie Smokeview.



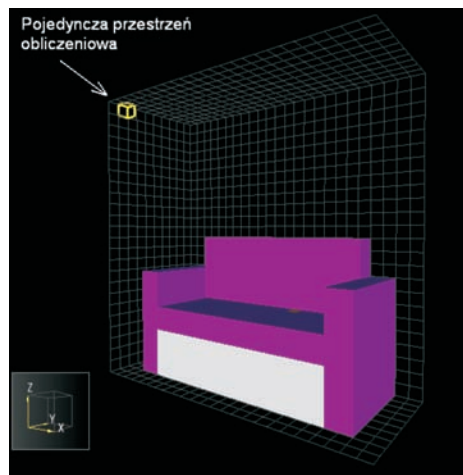
Rys. 1.3-a. Przykładowy widok pomieszczeń w programie Smokeview wygenerowany za pomocą programu CFAST

Źródło: opracowanie własne.

1.4. Aplikacja FDS

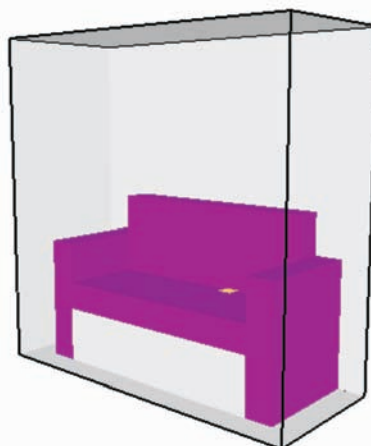
Aplikacja CFD (Computational Fluid Dynamics) jest dynamicznym modelem numerycznym stosowanym m.in. do symulacji pożarów pomieszczeń. Technika modelowania stosowana w aplikacji polega na rozwiązaniu układu równań

opisujących zasadę zachowania masy, pędu, energii oraz równanie stanu. Analizowana przestrzeń jest dyskretyzowana na wiele części, a szukane parametry, takie jak: temperatura, prędkość gazu, stężenie i ciśnienie, wyznaczone są oddzielnie dla każdej małej objętości pomieszczenia.



Rys. 1.4-a. Analizowany obiekt po dyskretyzacji. Wielkość pojedynczej komórki $|X| = 0,1 \text{ m}$; $|Y| = 0,1 \text{ m}$; $|Z| = 0,1 \text{ m}$

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 1.4-b. Widok analizowanego przedmiotu w programie Smokeview

Źródło: opracowanie własne.

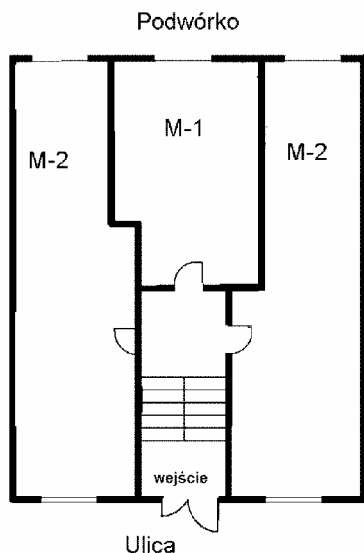
Podczas symulacji wyznaczone są parametry, takie jak: rozkład temperatury, stężenie gazów, zasięg widzialności. Minusem programu jest mało przyjazny interfejs wprowadzania danych – odbywa się to przez tworzenie komend w pliku tekstowym. Po wykonaniu obliczeń plik wynikowy może być wyświetlony w programie Smokeview.

Ułatwieniem w pracy z aplikacją FDS jest zainstalowanie oprogramowania Pyrosim, które pozwala tworzyć i edytować pliki FDS. Wprowadzanie danych wejściowych odbywa się wówczas w środowisku graficznym. Podgląd tworzonych obiektów odbywa się na bieżąco. Aplikacja posiada zespolony interfejs FDS i Smokeview.

2. Model obiektu

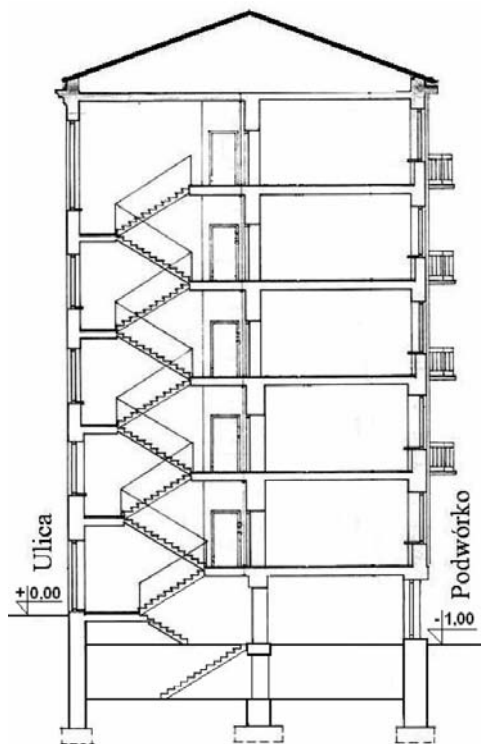
Analizowany obiekt charakteryzuje się ceglаныmi ścianami oraz wysokością do pięciu pięter. Uproszczony rzut i przekrój budynku przedstawiono na rys. 2-a i 2-b.

W analizowanym obiekcie należy zwrócić uwagę na poziom terenu od strony wewnętrznej (podwórce) oraz frontowej (ulica). Wejście do budynku od strony wewnętrznej jest obniżone o 1 m w stosunku do wejścia od strony frontowej. Konstrukcja ta ma znaczenie podczas realizacji działań wentylacyjnych w obiekcie.



Rys. 2-a. Uproszczony rzut analizowanego obiektu

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 2-b. Uproszczony przekrój analizowanego obiektu

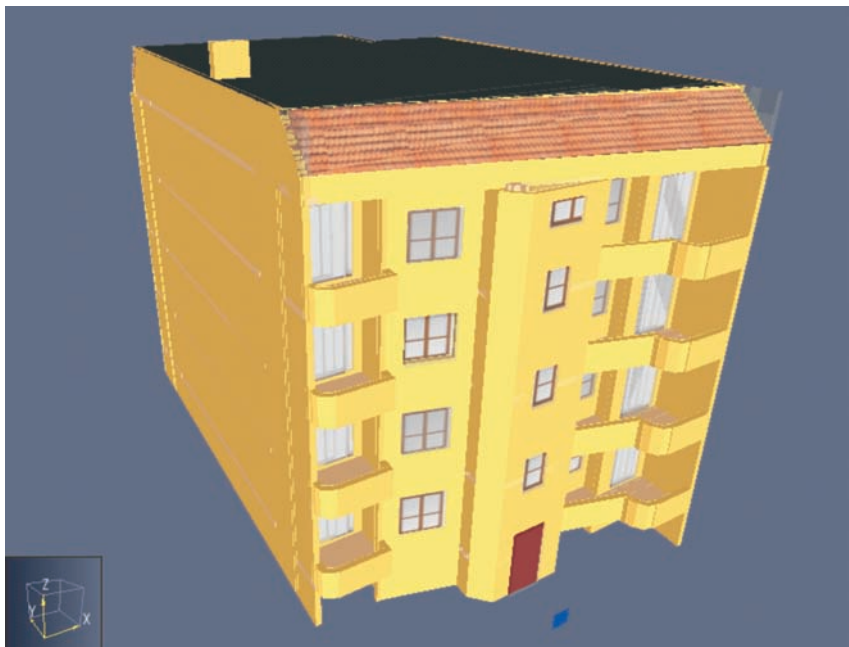
Źródło: opracowanie własne.

3. Symulacja rozwoju pożaru na przykładzie wybranego budynku mieszkalnego

3.1. Charakterystyka badanego budynku, parametry pożarowe materiałów

Analizowany obiekt budowlany jest odwzorowaniem istniejącego budynku znajdującego się we Wrocławiu. Budynek stanowi obiekt mieszkalny, wielorodzinny, pięciokondygnacyjny. Wysokość kondygnacji wynosi 3 m. Podłoga pierwszego piętra znajduje się 1,5 m powyżej poziomu terenu.

W analizie przyjęto założenie upraszczające o jednakowej aranżacji wszystkich pomieszczeń.



Rys. 3.1-a. Widok budynku od strony frontu

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 3.1-b. Widok od tylnej strony budynku

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 3.1-c. Widok trzeciego piętra analizowanego obiektu

Źródło: opracowanie własne.

Charakterystykę materiałów budowlanych stanowiących wyposażenie analizowanego obiektu przedstawiono w tabeli 3.1-a.

Tabela 3.1-a. Zestawienie składu elementów budynku

Nazwa elementu budynku	Grubość materiału (m)	Materiał
Strop	0,01	plytki
	0,16	żelbet
Ściana nośna	0,02	tynk cementowo-wapienny
	0,48	mur ceglany
	0,02	tynk cementowo-wapienny
Ściana działowa	0,02	tynk cementowo-wapienny
	0,12	mur ceglany
	0,02	tynk cementowo-wapienny
Dach	0,03	dachówka ceramiczna
Drzwi	0,04	dąb
Szafki kuchenne	0,002	sosna żółta
	0,014	plyta MDF
	0,002	sosna żółta
Krzesła i stół	0,04	sosna żółta

Źródło: opracowanie własne na podstawie [1, 13].

Tabela 3.1-b. Zestawienie parametrów materiałów wykorzystanych w symulacji

Nazwa materiału	Gęstość	Ciepło właściwe	Przewodność	Emisyjność	Współczynnik absorpcji	Ciepło spalania
	kg/m ³	kJ/(kg•K)	W/(m•K)	–	1/m	kJ/kg
plytki	2000	0,92	1,05	0,9	50 000	–
sosna żółta	640	2,85	0,14	0,9	50 000	21 200
żelbet	2500	0,84	1,7	0,9	50 000	-
tynek cementowo-wapienny	1700	1	0,82	0,9	50 000	-
mur ceglany	1800	0,88	0,77	0,9	50 000	-
dachówka ceramiczna	2000	0,8	1	0,9	50 000	-
dąb	800	2,51	0,22	0,9	50 000	18 400
plyta MDF	250	1,7	0,07	0,9	50 000	18 000

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [10, 11, 13].

3.2. Scenariusz pożarowy

Podczas analizy numerycznej założono powstanie i rozwój pożaru w pomieszczeniu salonu z aneksem kuchennym i jadalnią. Powierzchnia pomieszczenia to 23 m². Założono, że w chwili zainicjowania pożaru drzwi do mieszkania oraz duże drzwi balkonowe w salonie i okno są zamknięte. Dopływ świeżego powietrza do pomieszczenia salonu może odbywać się kanałem wentylacyjnym, szczeliną pod drzwiami, mikronieszczelnościami oraz otwartym oknem. Oszklenie w oknie i drzwiach balkonowych ulegnie zniszczeniu, jeżeli temperatura w pomieszczeniu przekroczy wartość 400°C.

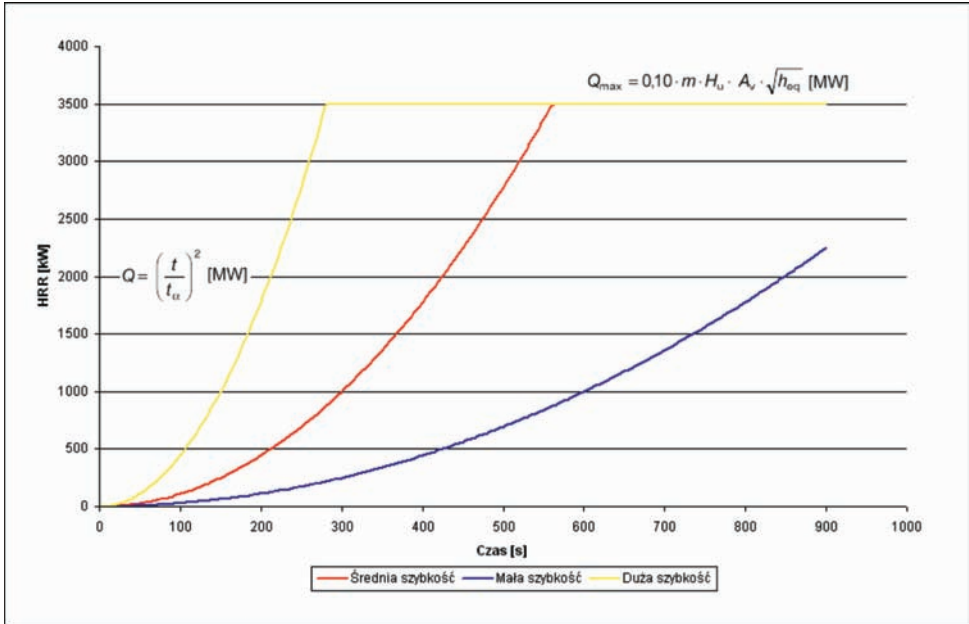
Uwzględniając dymotwórczość materiałów wyposażenia pomieszczenia ustalono, że sadza emitowana jest w ilości 0,053 kg na 1 kg spalanego materiału oraz tlenek węgla w ilości 0,034 kg/kg [2]. Symulację zrealizowano dla jednakowych warunków atmosferycznych:

- ciśnienie 1013 hPa,
- wilgotność względna 40%,
- temperatura 20°C,
- brak wiatru.

Dodatkowo założono, że warunki atmosferyczne na zewnątrz analizowanego obiektu są takie same jak wewnątrz.

W wyniku zrealizowanych symulacji można stwierdzić, że wzrost prędkości uwalniania ciepła pożaru można przedstawić schematycznie za pomocą krzywej HRR¹.

¹ ang. Heat Release Rate.



Rys. 3.2-a. Wzrost szybkości wydzielania ciepła (HRR)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [12].

Maksymalna moc, jaką może osiągnąć pożar w badanym pomieszczeniu została ustalona na podstawie ograniczenia krzywej HRR przez wentylację.

$$Q_{\max} = 0,1 \cdot m \cdot H_u \cdot A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} = 0,1 \cdot 0,8 \cdot 17,5 \cdot 2,1 \cdot \sqrt{1,4} = 3,48 \text{ MW}$$

gdzie:

A_v – powierzchnia otworów (m^2),

h_{eq} – średnia wysokość otworów (m),

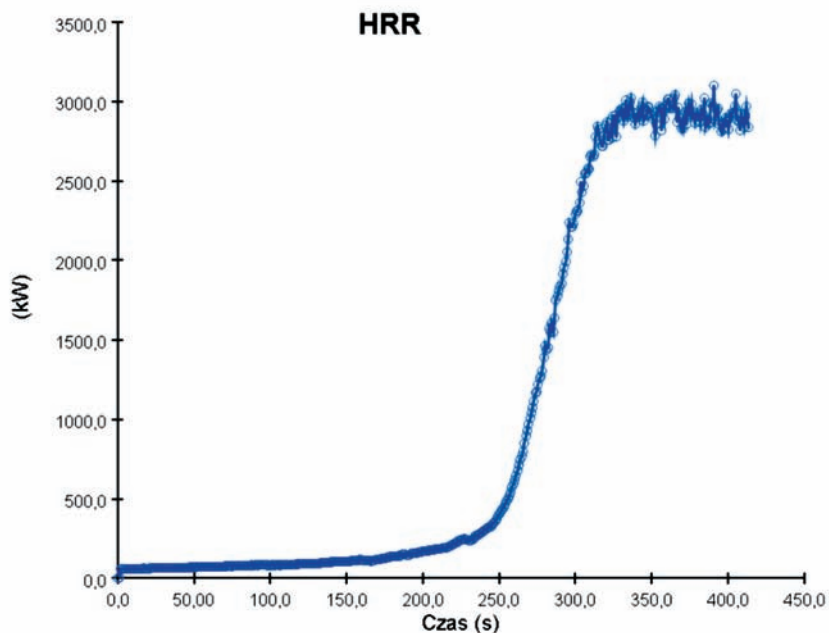
H_u – wartość ciepła spalania netto (MJ/kg),

m – bezwymiarowy współczynnik spalania.

Wartość maksymalnej mocy została sprawdzona przez wykonanie symulacji rozwoju pożaru w badanym pomieszczeniu z otwartym oknem z inicjacją na kuchence gazowej. Symulacja wykonana została na podstawie reakcji spalania materiałów w pomieszczeniu.

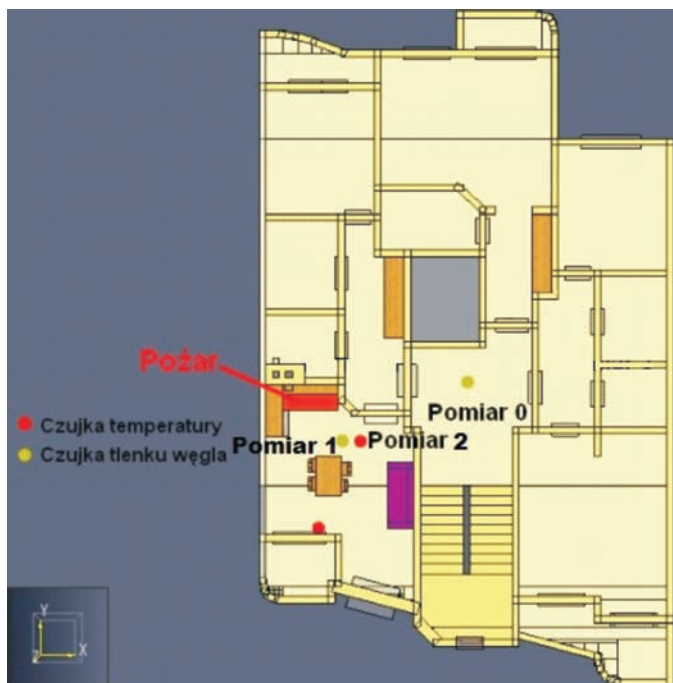
Na rys. 3.2-b przedstawiono prędkość uwalniania ciepła i maksymalną moc pożaru na poziomie 3 MW.

Pomiarów stężenia tlenu węgla dokonano na klatce schodowej na trzecim i czwartym piętrze oraz w pomieszczeniu kuchni (pomiar numer 0 i 1). Wszystkich pomiarów dokonano na wysokości dwóch metrów nad podłogą. Pomiar temperatury odbywał się w pomieszczeniu kuchni (pomiar numer 2). Rozmieszczenie punktów pomiarowych przedstawiono na rys. 3.2-c.



Rys. 3.2-b. Prędkość uwalniania ciepła – maksymalna moc pożaru

Źródło: opracowane własne na podstawie wyników programu Pyrosim.



Rys. 3.2-c. Rzut kondygnacji z pożarem, rozmieszczenie punktów pomiarowych

Źródło: opracowanie własne.

3.3. Symulacja przebiegu pożaru, propozycja realizacji działań ratowniczo-gaśniczych

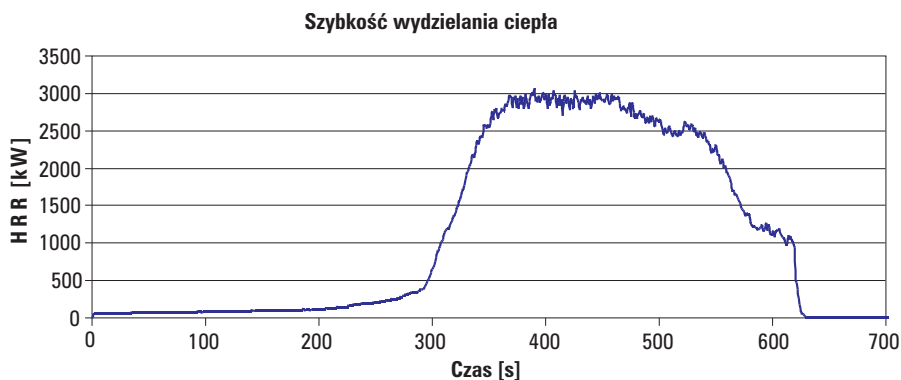
Podczas symulacji założono, że rozwój pożaru nastąpił w kuchni i spowodowany został pozostawieniem garnka z potrawą na kuchence gazowej. W pomieszczeniu okno było otwarte, drzwi wejściowe do pomieszczenia, jak i drzwi balkonowe, zamknięte. Realizację działań ratowniczo-gaśniczych przedstawiono w tabeli 3.3-a.

Tabela 3.3-a. Harmonogram działań ratowniczo-gaśniczych

Czas [s]	Podjęmowane działania
0	inicjacja pożaru
510	przybycie Straży Pożarnej, rozpoznanie, rozwinięcie jednej linii gaśniczej po klatce schodowej, ustawienie wentylatora przed wejściem do budynku
600	uruchomienie wentylatora, pulsacyjne dwu sekundowe wtrysnięcie rozproszonego prądu wody z PW-52 przez uchylone drzwi w warstwę podsufitową
604	zamknięcie drzwi wejściowych do mieszkania
615	otwarcie drzwi do mieszkania, wejście strażaków do środka
625	przymknięcie drzwi wejściowych do mieszkania, podanie prądu rozproszonego wody w warstwę podsufitową i na pożar
670	całkowite otwarcie drzwi wejściowych do mieszkania
700	koniec podawania wody do pożaru, kontynuowanie wentylacji
900	zakończenie symulacji, pożar ugaszony, pomieszczenie oddymione

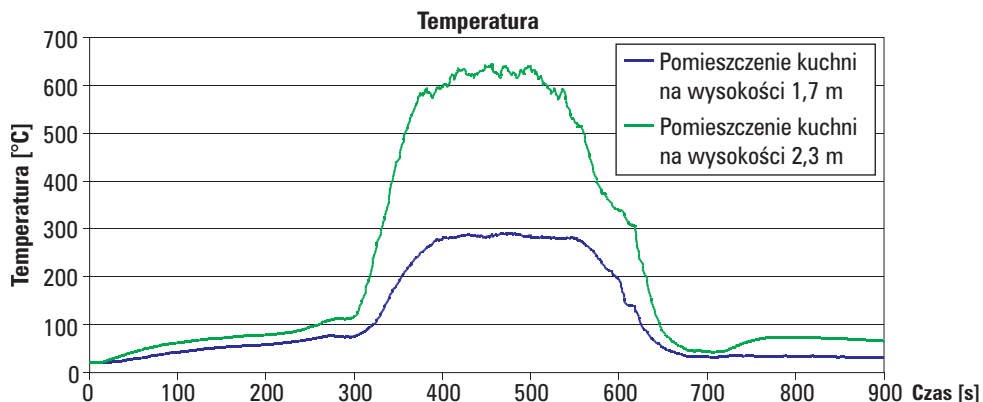
Źródło: opracowanie własne na podstawie [4].

Szybkość wydzielania ciepła HRR, wzrost temperatury oraz emisję tlenku węgla w funkcji czasu przedstawiono na rys. 3.3-a–3.3-c.



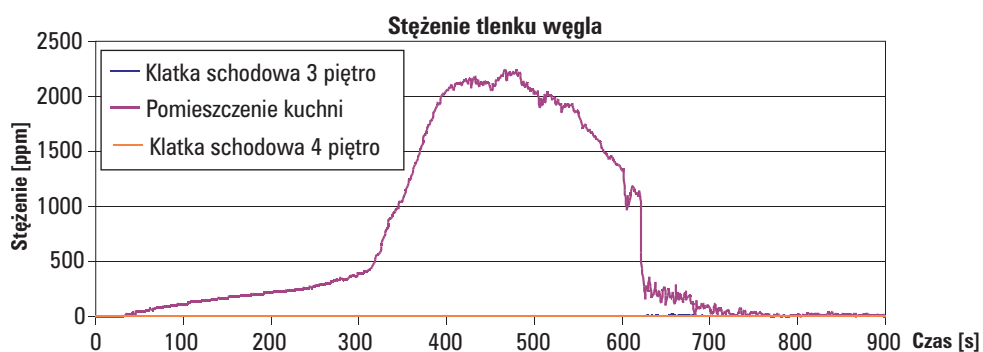
Rys. 3.3-a. Szybkość wydzielania ciepła podczas pożaru

Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników z programu FDS.



Rys.3.3-b. Przyrost temperatury pomieszczenia kuchni

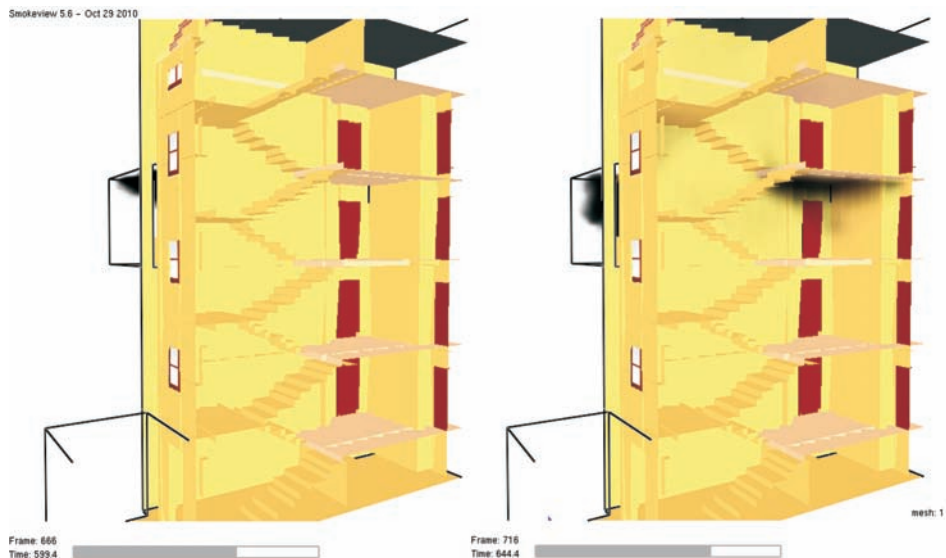
Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników z programu FDS.



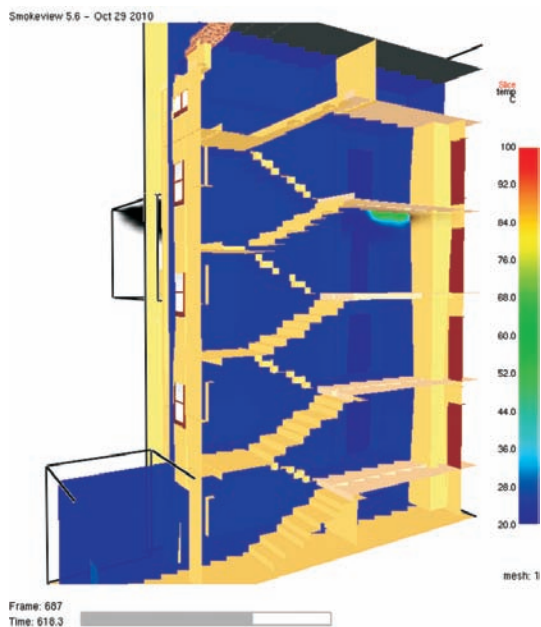
Rys.3.3-c. Emisja tlenku węgla

Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników z programu FDS.

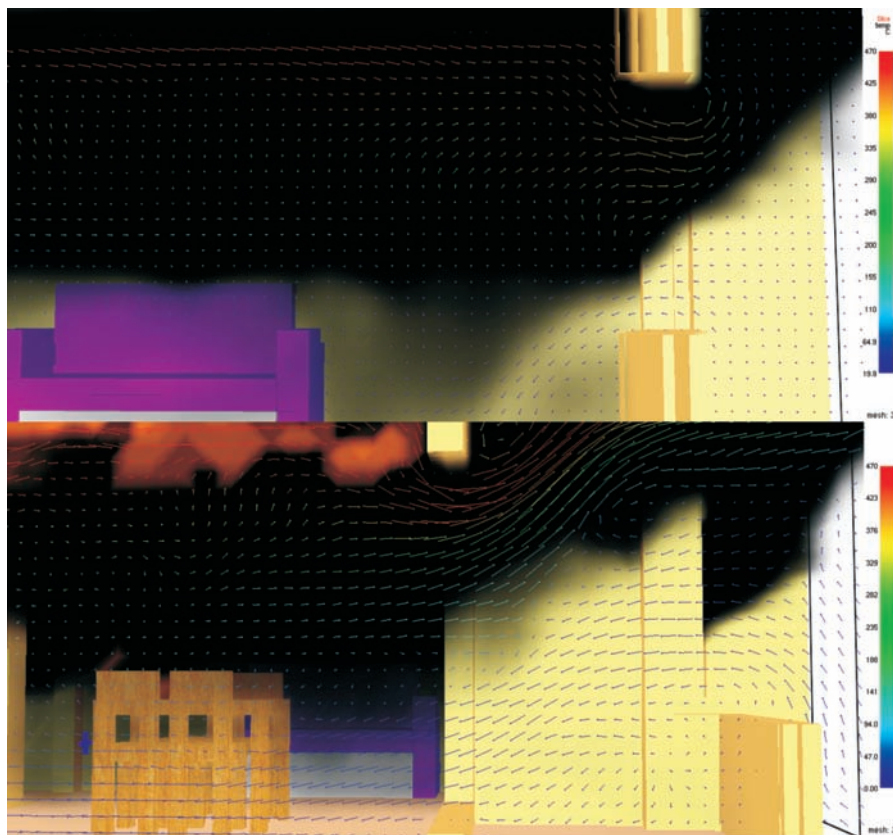
Przedstawione wyniki symulacji oraz analiza rozkładu temperatury, szybkość wydzielania gazów pożarowych i emisja tlenku węgla pozwalają stwierdzić, że prawidłowo przeprowadzono działania ratowniczo-gaśnicze. W opisanym scenariuszu nie występują niebezpieczne dla strażaków efekty nieliniowe. W miejscu pracy prądownika temperatura wynosi poniżej 100°C , a prowadzone działania gaśnicze z zastosowaniem prądu rozproszonego wody z PW-52 dają natychmiastowe rezultaty spadku temperatury i pośrednio rozrzedzenia gazów pożarowych. W dolnej części pomieszczenia nie występują niebezpieczne dla życia stężenie tlenku węgla oraz wysoka temperatura, co generuje duże prawdopodobieństwo przeżycia poszkodowanych.



Rys. 3.3-d. Zadymienie klatki schodowej przed otwarciem drzwi do analizowanego mieszkania i po nim
Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników z programu FDS.

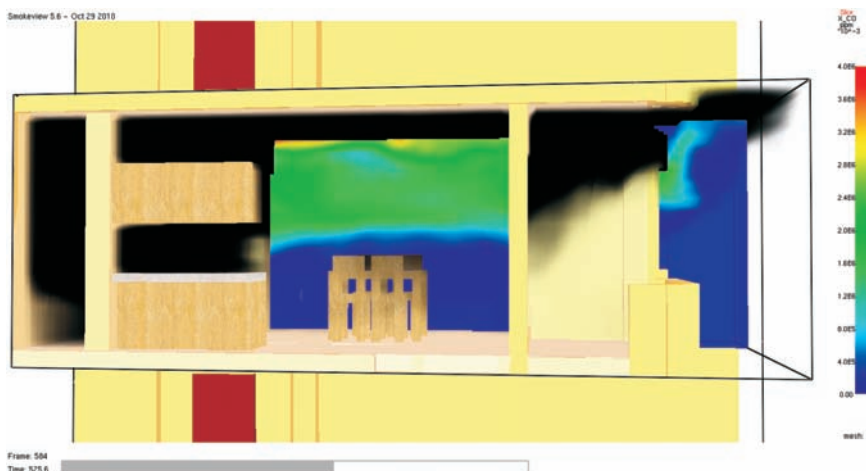


Rys. 3.3-e. Rozkład temperatury na klatce schodowej po wejściu do mieszkania
Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników z programu FDS.



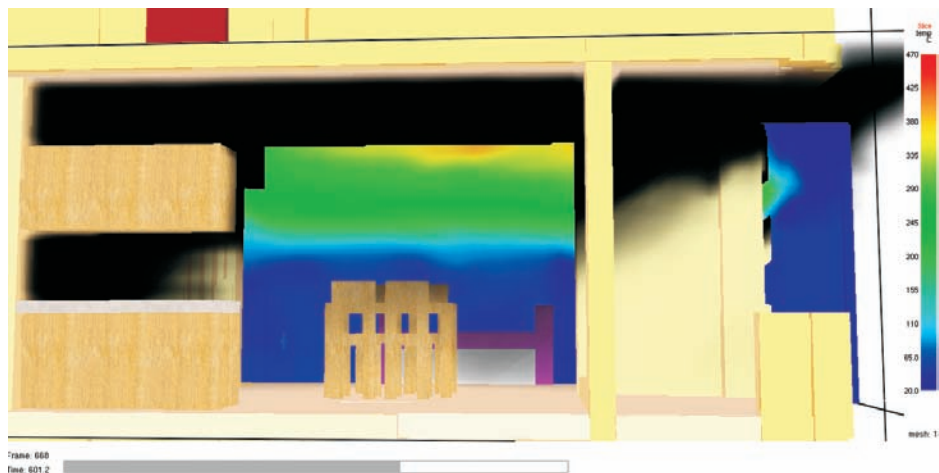
Rys. 3.3-f. Rozkład temperatury i wektorów prędkości mas powietrza w oknie i drzwiach balkonowych

Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników z programu FDS.



Rys. 3.3-g. Rozkład tlenku węgla w pomieszczeniu kuchni w momencie przybycia straży pożarnej

Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników z programu FDS.



Rys. 3.3-h. Rozkład temperatury w chwili wejścia strażaków do pomieszczenia kuchni
 Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników z programu FDS.



Rys. 3.3-i. Izopowierzchnia temperatury (100°C – żółta powierzchnia) w chwili wejścia strażaków do pomieszczenia

Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników z programu FDS.

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza pozwala stwierdzić, że modele polowe są przydatne nie tylko do celów szkoleniowych, ale również do ustalania i realizacji taktyki działań gaśniczych. W niektórych przypadkach, gdy zebrano szczegółowe informacje na temat obiektu budowlanego, składowanych w nim materiałów oraz stosując technikę symulacji numerycznej, można uzyskać niezbędne informacje o możliwości rozwoju i rozprzestrzeniania pożaru. Do użytecznych danych nu-

merycznych zaliczyć można m.in.: wartość i rozkład temperatury, stężenie tlenku węgla, wielkość zadymienia, widoczność. Pomimo realizacji symulacji numerycznej, należy bezwzględnie zwrócić uwagę, że technika ta stanowi przybliżenie sytuacji rzeczywistych. Uzyskane informacje o dynamice rozwoju pożaru analizowanych obiektów nie zwalniają kierujących działaniami ratowniczymi z bieżącego śledzenia rzeczywistego pożaru oraz dostosowania technik ratowniczych do zmienności sytuacji pożarowej.

Analizując dostępne aplikacje numeryczne, należy zwrócić szczególną uwagę na program FDS dający szerokie możliwości pozyskiwania danych podczas rozwoju pożaru. Program oferuje duże możliwości kształtowania danych wyjściowych, takich jak np. płaszczyzny rozkładu prędkości, temperatury, stężenia substancji, przebieg tych parametrów w czasie. Aplikacja daje możliwość wizualizacji przebiegu pożaru w czasie wraz z zobrazowaniem badanych parametrów. Wizualizacja odbywa się w darmowym programie Smokeview. Natomiast przebiegi wybranych parametrów są eksportowane do pliku arkusza kalkulacyjnego. FDS jest narzędziem na licencji Open Source, którego działanie jest korygowane przez liczne walidacje [6, 7]. Pomocnym narzędziem do wprowadzania danych wejściowych jest oprogramowanie Pyrosim, dzięki któremu wykonanie symulacji staje się znacznie prostsze, a sam program obsługuje się intuicyjnie. Jego zaletą jest to, że interfejs i instrukcje obsługi są w języku polskim [8, 9], minusem jest to, że nie jest to program darmowy. Dzięki niemu można symulować nie tylko sam rozwój pożaru ale również przyjętą taktykę działań, tj. podawanie prądów wody, działania wentylacyjne, wpływ innych działań na środowisko i rozwój pożaru.

Symulacje komputerowe pożarów oraz skutków działań podejmowanych przez straże pożarne z powodzeniem stosowane są podczas procesu dydaktycznego i stanowią doskonałą pomoc naukową dla wyjaśnienia i zobrazowania zjawisk występujących w środowisku pożaru.

Literatura

- [1] Coles A.R.: Flammability of upholstered furniture using the cone calorimeter, Report, wyd. University of Canterbury, Christchurch 2001.
- [2] Dietmar H.: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht TB 04-01, wyd. Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes, Altenberge 2009.
- [3] Jones W.W., Peacock R.D., Forney G.P., Reneke P.A.: CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6) Technical Reference Guide, wyd. NIST special publication 1034, Washington 2004.
- [4] Komenda Miejska Państwowej Straży Pożarnej we Wrocławiu, Analiza zabezpieczenia operacyjnego powiatu wrocławskiego – mapa, parametry czasowe, materiał niepublikowany, Wrocław 2011.
- [5] Konecki M.: Modelowanie Pożarów – wykład, materiał niepublikowany.

- [6] McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Floyd J.: Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide, Vol. 2: Verification, wyd. NIST Special Publication 1018-5, Baltimore 2010.
- [7] McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Floyd J.: Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide, Vol. 3: Validation, wyd. NIST Special Publication 1018-5, Baltimore 2010.
- [8] Stigo sp. z o.o., Pyrosim 2011 – instrukcja obsługi, wersja 2011.1, materiał niepublikowany, Kraków 2011.
- [9] Stigo Sp. z o.o., Pyrosim 2011 – podręcznik przykładów, wersja 2011.4, materiał niepublikowany, Kraków 2011.

Akty prawne:

- [10] Załącznik NC do PN-EN ISO 6946: 1999
- [11] PN-EN 12524:2003
- [12] PN-EN 1991-1-2, kwiecień 2006

Serwisy internetowe:

- [13] Drewno zamiast benzyny, <http://www.drewnozamiastbenzyny.pl/kalorycznosc-gatunkow-drewna/> (11.06.2014 r.)

Łukasz BUŁAŚ

Janusz Adam WRZESIŃSKI

The Use of Numerical Computer Simulation of Fire Spread for Operational and Training Purposes for Emergency Services

Computer numerical simulations are fairly common research method and teaching tools which are often used during the trainings and demonstrations. The problems in realization of real simulations imply the development of numerical methods, which in the satisfactory manner allow to show the technical condition of the equipment and processes, and the development of the projected threats for the analyzed objects. In this paper we would like to represent the numerical simulation for a given construction object. In additional we analyze the computational and simulation capabilities of the chosen computer programs, which were used for a given boundary condition of realized simulations.

Keywords: fire simulation, training firefighters, fire building.

SUMMARY