

st. kpt. mgr inż. **Damian SALETA**¹
mgr inż. **Izabela TEKIELAK-SKAŁKA**²
prof. dr hab. inż. **Robert SEKRET**³

Przyjęty/Accepted: 17.06.2013; **Zrecenzowany/Reviewed:** 12.08.2013; **Opublikowany/Published:** 30.09.2013

SPRAWDZENIE PRZYDATNOŚCI PROGRAMU FDS PRZY OCENIE ROZWOJU POŻARU MIESZKANIA DOSZCZELNIONEGO

Checking the Suitability of FDS Program in Fire Spread Assessment of Insulated Flat

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki oraz ocenę zgodności symulacji komputerowej pożaru modelowanego przy użyciu programu FDS w porównaniu z wynikami badań pożaru mieszkania doszczelnionego otrzymanych w warunkach eksperymentalnych. Badania przeprowadzono w budynku mieszkalnym w Bytomiu – ich celem była ocena wpływu szczelności pomieszczenia na rozwój pożaru. Przeprowadzone badania umożliwiły przyjęcie wiarygodnych i poprawnych założeń do scenariusza pożarowego oraz stanowiły bazę do wprowadzenia danych wejściowych do modelu. Po przeprowadzeniu analizy wykonanej symulacji pożaru oraz wyników pomiarów uzyskanych w skali rzeczywistej odnotowano różnicę w zakresie uzyskanych wartości ciśnienia i temperatury w punkcie T1 i T3, natomiast wartość temperatury w punkcie T2 oraz stężenie tlenu są zbliżone ze stanem faktycznym.

Summary

This paper presents the results and the compliance assessment of computer simulation of the modeled fire with the usage of FDS program. The obtained results were compared with test results obtained under experimental conditions of fire in well-insulated apartment. The purpose of the tests, which was carried out in a residential building in Bytom, was to evaluate the influence of air tightness of a room on the development of fire. The tests allowed to make reliable and correct assumptions for fire scenario and they constituted the base for entering the input data for the model. The analysis of the simulations and the results of measurements in real scale showed the difference in the obtained values of pressure, temperature at points T1 and T3, however, consistent with the temperature at point T2 and oxygen concentration.

Słowa kluczowe: pożary wewnętrzne, badania pożarów mieszkalnych w skali rzeczywistej, komputerowe modelowanie pożarów;

Keywords: compartment fires, full scale fire tests, CFD modeling;

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy;

Type of article: original scientific article;

1. Wstęp

W ostatnich latach w Polsce nastąpiło pewne przewartościowanie o charakterze jakościowym

¹ Komenda Miejska Państwowej Straży Pożarnej w Bytomiu, Jednostka Ratowniczo-Gaśnicza, ul. Strażacka 3 41-902 Bytom, Polska; saleta@wp.pl; wkład merytoryczny – 45% / The Municipal Headquarters of the State Fire Service in Bytom, Rescue and Firefighting Unit [editor's own translation] Poland; percentage contribution – 45%;

² Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Pożarnictwa, Oddział Katowice; 40-042 Katowice, ul. Wita Stwosza 36; Polska; wkład merytoryczny – 45% / The Association of Firefighting Engineers and Technicians. Division in Katowice [editor's own translation]; Poland; percentage contribution - 45%;

w procesie termomodernizacji budynków. Szczególnie widocznymi przedsięwzięciami w tym zakresie są [5]:

- obniżanie strat ciepła przez przegrody pełne, gdzie najczęściej wykonywaną metodą jest izolacja cieplna powierzchni zewnętrznych z płyt ze styropianu lub z wełny mineralnej/drzewnej,

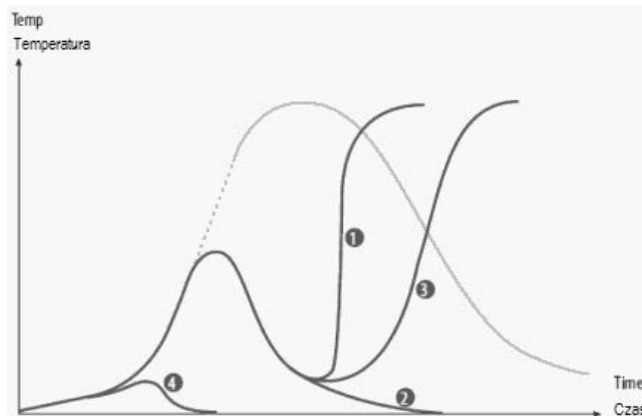
³ Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Środowiska i Biotechnologii, Samodzielny Zakład Ogrzewnictwa, Wentylacji i Klimatyzacji, ul. Brzeźnicka 60A, 42-200 Częstochowa; Polska; wkład merytoryczny – 10% / Częstochowa University of Technology, Faculty of Environmental Engineering and Biotechnology [editor's own translation], Poland; percentage contribution - 10%;

- obniżanie strat ciepła przez przenikanie przez okna. Najczęściej stosuje się wymianę okien na okna o wyższej izolacyjności cieplnej szyb i ościeżnic, zwykle wykonywane z PCW,
- dostosowywanie strumienia powietrza wentylacyjnego do rzeczywistych potrzeb poprzez stosowanie wentylacji mechanicznej według odpowiednich rozwiązań projektowych.

W przypadku starych budynków szczelność powietrzna była niewskazana, bowiem zapewnienie znacznej infiltracji powietrza pozwalało na prawidłowe działanie powszechnie stosowanej wentylacji grawitacyjnej. Obecnie w Polsce funkcjonują pewne nieobligatoryjne wymogi [3] określające przepuszczalność powietrzną budynków przy pomocy różnych metod, np. ciśnieniowy pomiar z użyciem wentylatora lub użycie kamery termowizyjnej. Tymczasem nieprawidłowo wykonany proces termomodernizacji w połączeniu z nieprawidłowo działającą wentylacją stanowi podczas pożaru śmiertelne zagrożenie dla użytkowników mieszkań.

Wśród różnych czynników wpływających na rozwój pożaru niewątpliwie duże znaczenie ma ciśnienie oraz stężenie tlenu wewnątrz pomieszczenia. Na te dwa czynniki wpływa m.in. różnica wartości temperatury pomiędzy powietrzem zewnętrznym a wewnętrznym, przepływ gorących gazów, bądź zahamowanie ich rozszerzalności cieplnej w strefie objętej pożarem, wiatr dostający się przez istniejące w budynku otwory i nieszczelności, czy też rodzaj zastosowanej wentylacji. Duża liczba zmiennych, a także nieznanymi i trudnymi do ustalenia wielkościami wynikającymi z różnorodności przebiegu pożaru wpływa na konieczność przyjęcia pewnych ustaleń co do celu przyjętych badań i analizy wybranych parametrów. Jednym z narzędzi do określania przebiegu pożaru według przyjętych założeń są komputerowe symulacje pożarów tworzone przy użyciu specjalistycznego oprogramowania opartego na metodach obliczeniowych numerycznej mechaniki płynów (*Computational Fluids Dynamic – CFD*). Każdy pożar charakteryzują takie wielkości jak: czas jego trwania, temperatura i intensywność wymiany gazowej, powierzchnia pożaru, liniowa prędkość rozprzestrzeniania, moc pożaru, gęstość zadymienia, masowa szybkość spalania. Jakakolwiek zmiana któregoś z tych parametrów powoduje zmianę pozostałych, te z kolei wpływają na parametr będący przyczyną tej zmiany [2]. Innym istotnym czynnikiem wpływającym na rozwój pożaru jest szczelność przestrzeni objętej pożarem. Jeżeli rozważana przestrzeń jest szczelna, może to prowadzić do gwałtownego wzrostu ciśnienia spowodowanego pożarem w tej przestrzeni, a tym samym ograniczenia możliwości napływu tlenu. Może to z kolei prowadzić do ograniczenia rozwoju pożaru, a nawet

jego samoczynnego wygaśnięcia. Ograniczenie ilości tlenu wiąże się również ze wzrostem toksyczności pożaru. Brak wystarczającej ilości tlenu powoduje, że materiały palne spalają się niezupełnie, co prowadzi do zwiększenia ilości tlenku węgla oraz palnych związków lotnych w dymie pożarowym.



Ryc. 1. Krzywa wzrostu pożaru przedstawiająca typowe rodzaje zachowań pożaru kontrolowanego przez wentylację [1]:

- 1 – możliwość wystąpienia zjawiska *backdraft* tj. bardzo szybkiego zapłonu gazów pożarowych i wybuchu płomieni za zewnątrz pomieszczenia,
- 2 – nagłe zgaśnięcie z powodu braku tlenu,
- 3 – zapalenie gazów pożarowych na skutek dopływu powietrza po otwarciu drzwi przez strażaków,
- 4 – przy swobodnym dostępie powietrza występuje zbyt małe obciążenie ogniowe, by wystąpiło zjawisko *flashover*.

Fig. 1. Curve of fire development presenting typical types of fire behavior controlled by ventilation [1].

- 1 – the possibility of *backdraught*,
- 2 – the fire spontaneously goes out due to a lack of oxygen,
- 3 – the smoke gases ignition as a consequence of air flow coming into the room after opening the door by firefighters,
- 4 – by the normal air flow the total fire load is small, which means that the fire does not release sufficient heat to cause a *flashover*.

2. Cel badań oraz przyjęte założenia

W dniu 20 września 2012 roku przeprowadzono w Bytomiu dwuetapowy eksperyment (test pożarowy), którego celem było zbadanie przebiegu pożaru w dwóch lokalach mieszkalnych o takim samym układzie przestrzennym. Pierwszy test odbył się w lokalu o podwyższonym stopniu szczelności, natomiast drugi w lokalu rozszczelnionym. Jednym z założeń przyjętych do badań była ocena zgodności modelowania pożaru przy zastosowaniu różnych programów numerycznej mechaniki płynów CFD [6], w tym FDS (*Fire Dynamics Simulator*) z wynikami rzeczywistego pożaru o ograniczonym dostępie tlenu.

W celu sprawdzenia przydatności programu FDS w niniejszym artykule porównano wyniki otrzymane w skali rzeczywistej dla pożaru doszczelnionego z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu programu PyroSim, będącego graficznym interfejsem użytkownika dla środowiska FDS. Ocena wiarygodności modeli pożarów jest niezwykle trudna, wymagająca specjalistycznej wiedzy i zrozumienia m.in. wielu uproszczeń obliczeniowych używanych przez programy CFD. Jednym z uproszczeń modelu matematycznego programu FDS jest model spalania z nieograniczonym dostępem tlenu. Mając to na uwadze, zweryfikowano dokładność prowadzonej symulacji w odniesieniu do wartości ciśnienia, temperatury, a także stężenia tlenu.

2.1. Charakterystyka miejsca badań

Miejscem badań był nieistniejący obecnie budynek mieszkalny położony w Bytomiu przy ul. Pocztowej, w dzielnicy Karb. Charakterystyka budynku:

- 5-kondygnacyjny, w zabudowie segmentowej (4 klatki schodowe), wzniesiony w 1976 roku, wykonany w technologii płyty żelbetowej prefabrykowanej oraz betonu komórkowego szarego;
- z uwagi na powstałe szkody tj. spękania, zarysowania ścian, zniszczenie dylatacji, spowodowane wpływem eksploatacji górniczej budynek został wyłączony z użytkowania i przeznaczony do wyburzenia.

Badania przeprowadzone zostały w narożnym segmencie budynku o numerze 15, zamykającym ciąg zabudowy przy ul. Pocztowej 5-15.



Ryc. 2. Widok budynku mieszkalnego przy ul. Pocztowej 15 w Bytomiu przewidzianego do testów pożarowych (przed etapem usunięcia płyt elewacyjnych zawierających azbest, lipiec 2012 r.)

Fig. 2. Residential building used for the fire tests (picture taken before the removal of cladding panels containing asbestos, July 2012)

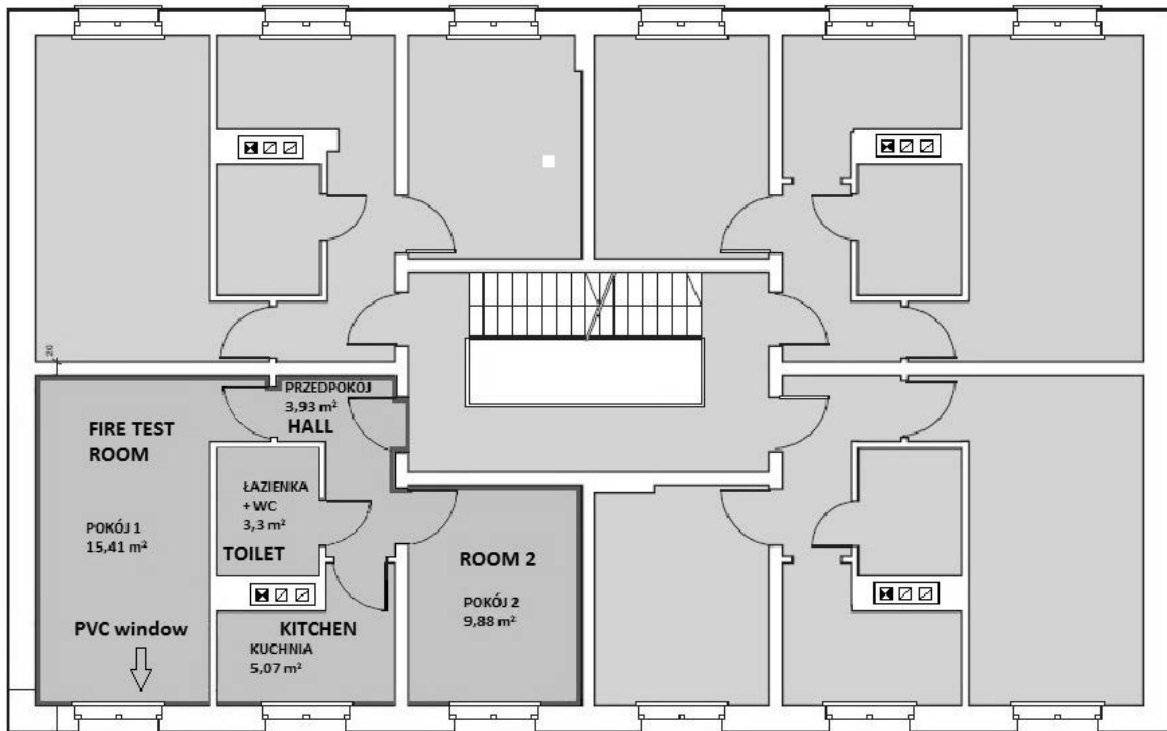
Test pożarowy dla mieszkania doszczelnionego przeprowadzono na IV piętrze w lokalu nr 19 o pow. 36,56 m². Kubatura pomieszczenia wynosiła 91,4 m³. Źródło pożaru zlokalizowane było w pokoju wypoczynkowym o pow. 15,41 m². Test pożarowy został przeprowadzony w godz. od 12.17 do 12.47. Mieszkanie składało się z dwóch pokoi, kuchni, łazienki oraz przedpokoju.

W trakcie trwania pierwszego testu pożarowego (dla mieszkania doszczelnionego) drzwi do mieszkania oraz do wejścia na klatkę schodową znajdowały się w pozycji zamkniętej, natomiast drzwi wewnętrzne w mieszkaniu były w pozycji uchylonej. Stanowisko pomiarowe do bieżącej rejestracji wyników badanego pożaru umieszczono w mieszkaniu znajdującym się poniżej, bezpośrednio pod pokojem.

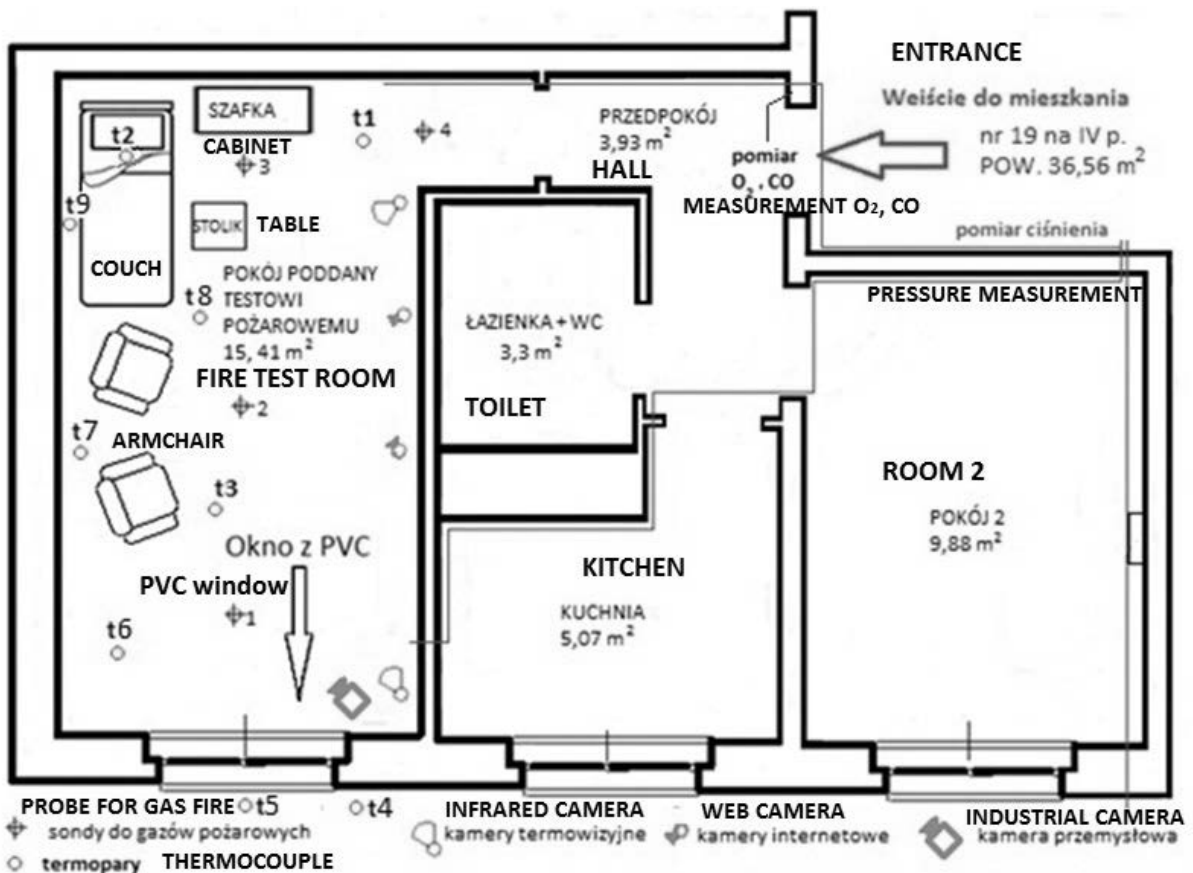
2.2. Metodyka prowadzonych badań

Podczas przeprowadzonych testów pożarowych badano m.in.:

- stężenia gazów pożarowych przy użyciu jedni- i wielokanałowych analizatorów gazów, chromatografów gazowych oraz aparatury pomocniczej. W tym celu w pokoju, gdzie zlokalizowane było miejsce pożaru, umieszczono cztery sondy próbobiorcze:
 - jedna przy podłodze na wysokości 90 cm – sonda nr 2,
 - dwie na wysokości 160 cm – sonda nr 1 i 3,
 - jedna pod stropem (sufitem) na wysokości 230 cm – sonda nr 4.
- temperaturę, która rejestrowana była w pomieszczeniu objętym pożarem, przy użyciu dwóch kamer termowizyjnych oraz ogółem przez 9 termopar i drzew termopar, w tym: 7 termopar wewnątrz pomieszczenia i 2 termopary na zewnątrz budynku.
 - Termopary t1 oraz t2 zamocowane zostały na wysokości 200 cm od podłogi.
 - Termopara t3 zamieszczona została na wysokości 150 cm od podłogi.
 - Termopara t4 i drzewo termopar t5 z 3 punktami pomiarowymi – mierzyły parametry otoczenia zewnętrznego przy oknie.
 - Drzewa termopar t6, t7, t8, t9 z 8 punktami pomiarowymi na wysokości 100 cm, 130 cm, 160 cm, 180 cm, 200 cm, 220 cm, 230 cm, 240 cm od podłogi.
- warunki meteorologiczne, przy użyciu przenośnej stacji meteorologicznej, umieszczonej na dachu budynku,



Ryc. 3. Rzut poziomy 5-tej kondygnacji budynku z zaznaczeniem lokalu mieszkalnego nr 19 (doszczelnionego)
 Fig. 3. Floor plan of 5th storey with location of experimental compartment no. 19 (sealed)



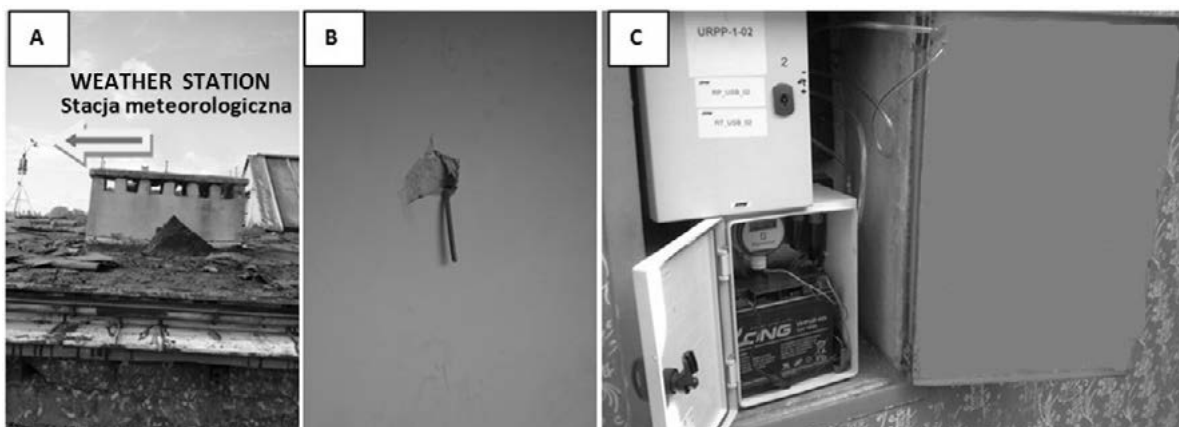
Ryc. 4. Przykład rozmieszczenia drzew termopar, metalowych sond do pomiaru gazów pożarowych oraz kamer w mieszkaniu doszczelnionym
 Fig. 4. The example of the distribution of thermocouples, metal probes for measuring fire gases as well as cameras in a sealed residential unit

- doszczelniono mieszkanie nr IV piętrze, poprzez:
 - zamontowanie nowego okna PVC,
 - uszczelnienie przepustów instalacyjnych ogniochronną pęczniejącą masą uszczelniającą oraz innych występujących otworów taśmami uszczelniającymi.
- pomiary szczelności obu pomieszczeń wykonano w przeddzień badań metodą „Blower Door Test”, Test Standard Modell 4 EN 13829.
 - np. współczynnik godzinowej krotności wymian powietrza n_{50} dla pomieszczenia doszczelnionego wyniósł $5,8 [h^{-1}]$, a przepuszczalność powietrzna $q_{50} = 5,7 [m^3/m^2 h]$ przy 50 Pa.



Ryc. 5. Przykład umieszczenia drzewa termopar. Wzdłuż okna PVC na zewnątrz oraz przy spalonym fotelu po wykonanym teście pożarowym

Fig. 5. The example of thermocouples distribution – along PVC window and near burnt down armchair after fire test



Ryc. 6. Widok ustawionej stacji meteorologicznej na dachu budynku (A); Sondy do pomiaru ciśnienia w jednym z pomieszczeń (B); Przenośny rejestrator parametrów powietrza oraz do pomiaru ciśnienia (C)

Fig. 6. Weather station positioned on the roof of the building (A); Probes for pressure measurements in one of the rooms (B); Portable recorder of air parameters and pressure measurement (C)



Ryc. 7. Miejsce i źródło zapłonu
Fig. 7. Place and source of ignition

Tabela 1.

Zestawienie materiałów palnych znajdujących się w badanych mieszkaniach [4]

Table. 1.

List of flammable materials in tested flats [4]

Zestawienie materiałów List of materials				
Wyposażenie/ Equipment	Element/ Parts	Material/ Material	Gęstość kg/m³ Density	Ciepło właściwe kJ/(kg*K)/ Specific heat
Tapczan Couch	Spód Bottom	Drewno Wood	640	2,85
	Materac Mattress	Pianka Foam	28	1,7
		Poliester Polyester	1200	1,256
		Akryl Acrylic	1040	1,507
Fotel Armchair	Oparcie The back	Pianka Foam	28	1,7
		Poliester Polyester	1200	1,256
		Akryl Acrylic	1040	1,507
	Porecz Railing	Drewno Wood	640	2,85
	Stelaż Frame	Stal Steel	7850	0,46
Meblościanka Cabinet		Drewno Wood	640	2,85
Stolik Table	Blat i Obrus Top and Tablecloth	Drewno Wood	640	2,85
		Poliester Polyester	1200	1,256
	Nogi Legs	Drewno Wood	640	2,85
Koc blanket		Poliester Polyester	1200	1,256
Pościel, poduszka bedding, pilow		Bawełna Cotton	74	1,3
Spodnie Trousers		Bawełna Cotton	330	1,3
Sweter Pullover		Wełna Wool	225	1,88
Makulatura Waste paper	Czasopisma, gazety Journals, papers, magazines	Papier Paper	900	1,42

Do zainicjowania zapłonu posłużył:

- stosik z drewna świerkowego z gazikiem nasączonym 96% alkoholem etylowym, wykonany wg brytyjskiej normy BS 5852 „wood crib 7”.
- palnik do lutowania z jednorazowym pojemnikiem z mieszaniną gazów propan/butan (35% propan, 65% butan).

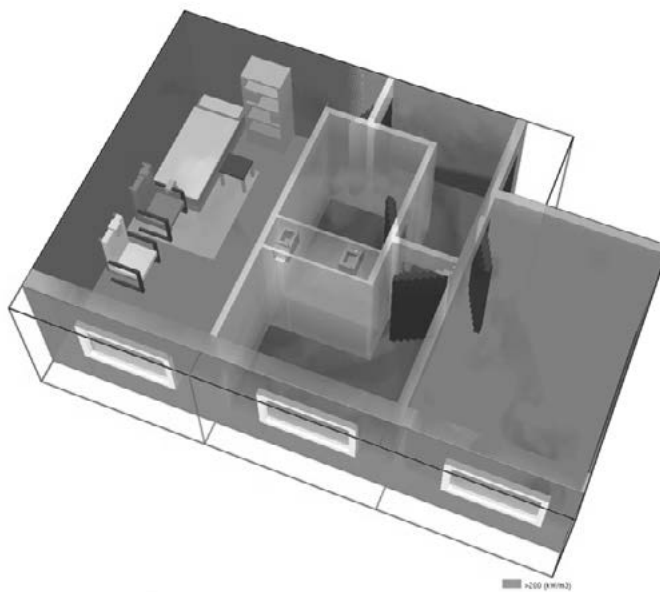
3. Komputerowe modelowanie rozwoju pożaru przy użyciu programu FDS

Znając przebieg rozwoju pożaru w mieszkaniu rzeczywistym, przystąpiono do próby odwzorowania jego przebiegu za pomocą symulacji komputerowych. Analizę rozwoju pożaru przeprowadzono w programie FDS, w którym zbudowano model numeryczny całego analizowanego mieszkania testowego składającego się z dwóch pokoi, kuchni, łazienki oraz przedpokoju. Nieszczelności mieszkania zamodelowano jako otwory zlokalizowane w dolnej i górnej części drzwi oraz okien. W modelu odwzorowano również wyposażenie pokoju, w którym zainicjowano pożar, składające się z dwóch foteli, tapczanu wraz z pościelą i kocem, stolika oraz meblówścianki. Wszystkie elementy wyposażenia charakteryzowały się właściwościami odpowiadającymi właściwościom materiałów użytych w rzeczywistości.

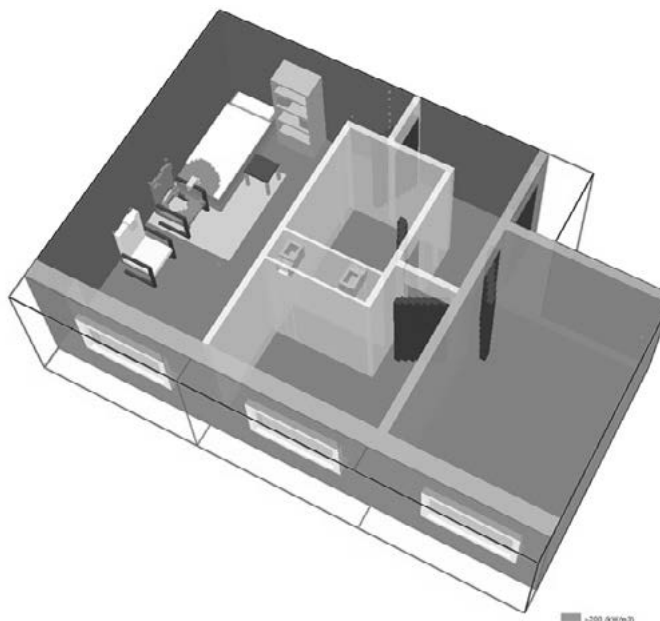
W celu odwzorowania pożaru testowego na powierzchni jednego z foteli utworzono powierzchnię „Burner” (powierzchnia płonąca). W analizie założono, że ilość ciepła oddawana przez tę powierzchnię będzie odpowiadała ilości ciepła wydzielanej podczas spalania stosika z drewna użytego do zainicjowania pożaru rzeczywistego i będzie równa 2210 kJ. Założono również, że ciepło będzie oddawane przez tę powierzchnię w okresie 390 s ze stałą intensywnością. Analiza numeryczna przeprowadzona dla tych założeń wykazała, że warunek brzegowy „Burner” nie jest w stanie spowodować zapłonu otaczających go materiałów palnych. Po przeanalizowaniu wyników otrzymanej symulacji stwierdzono, że ciepło wydzielane przez powierzchnię płonąca oddawane jest do pomieszczenia głównie poprzez konwekcję, z minimalnym udziałem promieniowania [4].

W celu weryfikacji otrzymanych wyników stworzono drugi model obliczeniowy, do którego ciepło oddawane było z wykorzystaniem warunku „Heater” – powierzchni grzejnych znajdujących się na bokach małego prostopadłościanu imitującego rzeczywiste źródło zapłonu. Zastosowane powierzchnie grzejne miały za zadanie oddać do pomieszczenia testowego taki sam strumień ciepła i w takim samym czasie, jak zakładana wcześniej powierzchnia „Burner”. Zmiana ustawień znacząco wpłynęła na przebieg modelowanego pożaru, pozwalając na zapłon materiałów znajdujących się w pomieszczeniu. Podczas przeprowadzonej analizy spaleni uległ fo-

tel i część łóżka, co dało wyniki zbliżone do rezultatu otrzymanego w warunkach rzeczywistych [4].

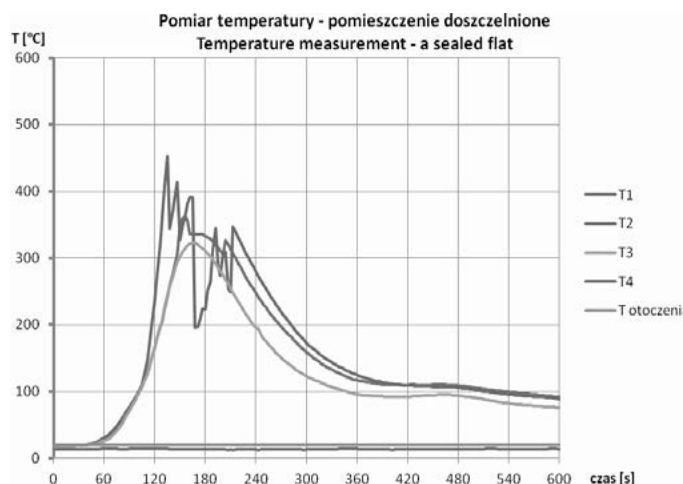


Ryc. 8. Geometria modelu obliczeniowego. Widok pierwszego modelu obliczeniowego po czasie 900 s
Fig. 8. Geometry of the CFD model. First CFD model after 900 seconds



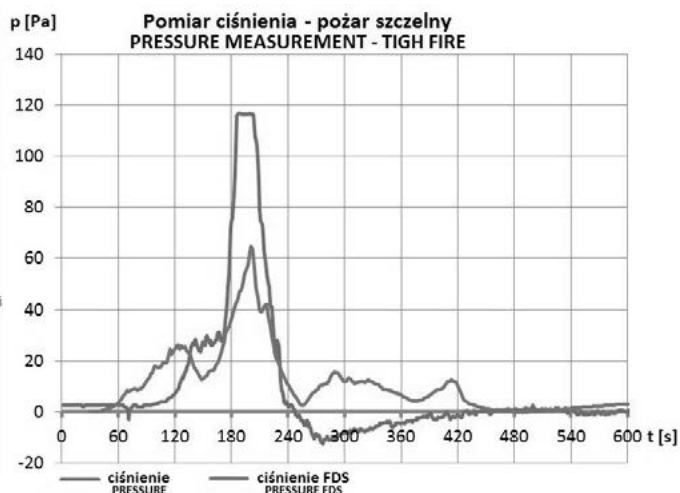
Ryc. 9. Widok drugiego modelu obliczeniowego po czasie 900 s. Spaleni uległ fragment łóżka oraz fotel
Fig. 9. Second CFD model after 900 seconds. Part of the bed and the armchair was charred

Podczas analizy komputerowej monitorowano temperaturę w trzech punktach pomiarowych T1, T2 i T3, ciśnienie oraz stężenie tlenu i tlenku węgla. Pomiar prowadzono w punktach odpowiadającym ich rzeczywistej lokalizacji.



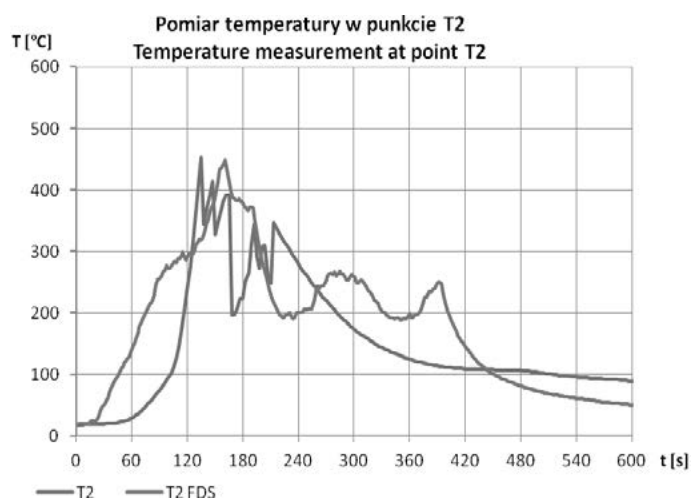
Ryc. 10. Wykres przedstawiający pomiar temperatury w punkcie T1, T2, T3, T4 dla mieszkania doszczelnionego.

Fig. 10. Chart presenting temperature measurement at point T1, T2, T3, T4 for a sealed flat



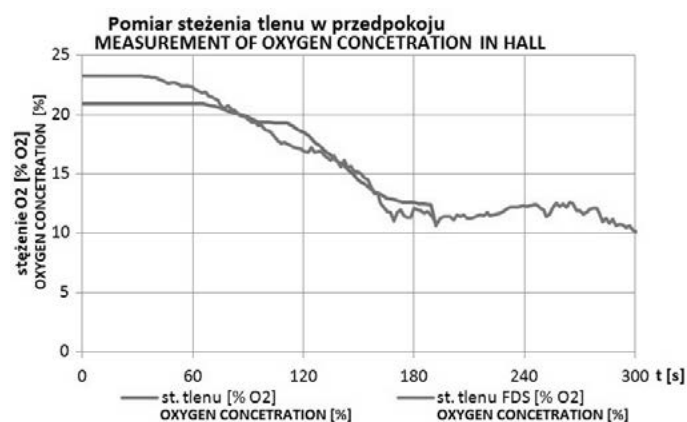
Ryc. 13. Wykres przedstawiający obliczeniowy i rzeczywisty rozkład ciśnienia w mieszkaniu doszczelnionym w okresie 10 min

Fig. 13. Chart presenting computational and real layout of pressure in sealed flat within 10 minutes



Ryc. 11. Wykres przedstawiający wyniki obliczeniowe T2 FDS i rzeczywiste T2 temperatury (termopara T2 umieszczona pomiędzy tapczanem a fotelem)

Fig. 11. Chart presenting computational results T2 FDS and real results for temperature (thermocouple T2 positioned between the bed and the armchair)



Ryc. 12. Wykres przedstawiający obliczeniowy i rzeczywisty rozkład stężenia tlenu w pomieszczeniu przedpokoju w okresie 5 min

Fig. 12. Chart presenting computational and real layout of oxygen concentration in a hall within 5 minutes

Po przeprowadzeniu obliczeń stwierdzono, że otrzymane w trakcie analizy numerycznej temperatury utrzymują się na poziomie zbliżonym do temperatur zmierzonych w trakcie eksperymentu w skali rzeczywistej. Dla przykładu termopara T2 w obu przypadkach wskazywała wartość maksymalną równą ok. 450°C, osiągniętą w zbliżonym czasie. Temperatury mierzone w pozostałych punktach pomiarowych były już mniej zbieżne, tj. dla termopary w punkcie T1 program wyliczył wartość temperatury na 400°C a dla punktu T3 na poziomie 440°C, podczas gdy w pożarze rzeczywistym maksymalna temperatura w punkcie T1 osiągnęła wartość 362,6°C, a dla punktu T3 wartość ta wyniosła 322,8°C. Stężenie tlenu monitorowane w trakcie obliczeń zmieniało się proporcjonalnie do zmian w trakcie pomiarów rzeczywistych. Program FDS przyjął domyślnie wartość obliczeniową stężenia tlenu na poziomie 23%, co przedstawia ryc. 16. W przeprowadzonej symulacji osiągnięto także zbliżoną do warunków rzeczywistych szybkość rozprzestrzeniania się warstwy dymu. Największe różnice pomiędzy obliczeniami numerycznymi oraz pomiarami w skali rzeczywistej wystąpiły w trakcie pomiaru ciśnienia. W trakcie pomiarów odnotowano wzrost ciśnienia przekraczający 100 Pa, natomiast obliczenia w programie FDS/PyroSim dały wzrost do ok. 60 Pa [10].

Na otrzymane wyniki z pewnością wpływ miały wszystkie poczynione założenia, zarówno dotyczące właściwości materiałów, wielkości nieszczelności w modelu, jak i ustawienia samego źródła zapłonu. Jednak otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że wartości otrzymane w trakcie symulacji w programie FDS pozwalają na przybliżoną ocenę rozwoju pożaru w szczelnym pomieszczeniu.



Ryc. 14. Widok miejsca pożaru w mieszkaniu doszczelnionym – przed wykonaniem testu pożarowego.

Fig. 14. Experimental set-up in a sealed flat – before fire test



Ryc. 15. Widok miejsca pożaru w mieszkaniu doszczelnionym – po wykonaniu testu pożarowego

Fig. 15. A sealed flat after fire test

4. Wnioski

Po analizie wykonanej symulacji pożaru, a także wyników pomiarów uzyskanych w skali rzeczywistej wysunięto następujące wnioski:

- zarówno podczas badania pożaru w pełnej skali, jak i w przeprowadzonej symulacji doszło do samoczynnego wygaśnięcia pożaru,
- odnotowane stężenie tlenu w pożarze rzeczywistym w pomieszczeniu przedpokoju w 3. minucie 12. sekundzie wyniosło 10,6%, co jest zbliżone z wynikami symulacji,

- wartość temperatury otrzymana w punkcie T2, tj. na poziomie 200 cm od podłogi, w 135. sekundzie pożaru rzeczywistego osiągnęła poziom 452,6°C, czyli prawie ten sam poziom, co obliczona wartość 450°C,
- w porównaniu z pożarem rzeczywistym nie używano zbieżności obliczonej wartości temperatury ze stwierdzonymi wartościami w punktach T1 i T3. Największa różnica wystąpiła dla termopary w punkcie T3 tj. na poziomie 150 cm od podłogi,
- podczas testu pożarowego w mieszkaniu doszczelnionym w 3. minucie 20. sekundzie zaobserwowano skokowy wzrost ciśnienia do wartości 134 Pa, nieskutkujący wybięciem szyb. Wzrostu na tym poziomie nie odnotowano w obliczeniach programu FDS,
- przeprowadzone badanie w skali rzeczywistej pozwoliło na przyjęcie wiarygodnego założenia do scenariusza pożarowego, a tym samym poprawne wprowadzenie danych wejściowych do modelu pożaru i uzyskanie zgodności obliczeniowej dla wartości temperatury oraz stężenia tlenu.

Biorąc po uwagę przedstawione wnioski, należy stwierdzić, że niewątpliwie warunkiem potwierdzającym poprawność przyjmowanych założeń do symulacji oraz jej wyników jest ich walidacja w warunkach rzeczywistych. Z uwagi na obszerność i złożoność poruszanych zagadnień z całą pewnością nie wyczerpano całości problemów badawczych. Materiał ten stanowi jedynie wkład w potrzebę dokonywania większej liczby analiz modelu rozwoju pożaru w pełnej skali.

Literatura

1. Bengtsson L-G., *Enclosure fires*, Swedish Rescue Services Agency, NSR Tryckeri Huskvarna 2001, Sweden, s. 11–83.
2. Kosiorek M., *Bezpieczeństwo pożarowe budynków*, [w:] *Budownictwo ogólne, Tom 2. Fizyka Budowli*. Praca zb. pod red. Klemm P, Wyd. Arkady, Warszawa 2009, s. 669–681.
3. PN-EN 13829:2002, Właściwości cieplne budynków. Określanie przepuszczalności powietrznej budynków. Metoda pomiaru ciśnieniowego z użyciem wentylatora.
4. Saleta D., Tekielak-Skałka I., *Analiza rozwoju pożaru mieszkalnego w skali rzeczywistej*, Międzynarodowe Seminarium Naukowe, Ochrona przeciwpożarowa – Wiosna 2013, 18-21 marca 2013 r., Zakopane.
5. Sekret R., Saleta D., *Bezpieczeństwo pożarowe budynków mieszkalnych poddanych termomodernizacji*, [w:] Gil A., Nowacka U., Chmiel M., (red.) *Inżynieria bezpieczeństwa a zagrożenia cywilizacyjne*, Wyd. CS PSP, Częstochowa, s. 9–46.

6. Sekret R., Saleta D., Sztarbała G., Smardz P., *Comparison of CFD Modelling with Fire Tests, Application of Structural Fire Engineering*, 19-20 April 2013, Prague, Czech Republic, pp. 55–60.

st. kpt. mgr inż. Damian Saleta – jest dowódcą zmiany w Jednostce Ratowniczo-Gaśniczej PSP w Bytomiu, a także doktorantem na Wydziale Inżynierii Środowiska i Biotechnologii Politechniki Częstochowskiej. Jego zainteresowania naukowe skupiają się na zagadnieniach dotyczących bezpieczeństwa pożarowego budynków mieszkalnych, w tym rozwoju pożarów wewnętrznych.

mgr inż. Izabela Tekielak-Skałka – jest członkiem Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Pożarnictwa, Oddział w Katowicach. Swoje zainteresowania

skupia na zagadnieniach dotyczących komputerowego modelowania pożarów, wentylacji pożarowej, w tym systemów różnicowania ciśnień w budynkach wysokich.

prof. dr hab. inż. Robert Sekret – jest kierownikiem Samodzielnego Zakładu Ogrzewnictwa, Wentylacji i Klimatyzacji Wydziału Inżynierii Środowiska i Biotechnologii Politechniki Częstochowskiej. Zainteresowania skupia głównie na aspektach energii w inżynierii środowiska w szczególności na efektywnych energetycznie i zrównoważonych środowiskowo systemach zaopatrzenia budynków w energię.