

mł. ogn. pchor. Mateusz KOMORZYCKI  
mł. bryg. mgr inż. Przemysław WYSOCZYŃSKI  
st. kpt. dr inż. Norbert TUŚNIO  
Szkoła Główna Służby Pożarniczej

## **Wizualizacja pożaru w symulatorze do szkolenia i treningu wspomagającego dowodzenie podczas działań ratowniczych związanych z pożarami w budynkach wielokondygnacyjnych**

### **Fire Visualization in Simulator for Education and Training, Supporting the Leadership during Rescue Operations in Fires of Multi-Storey Buildings**

#### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono opis wizualizacji dymu i płomieni w symulatorze do szkolenia i treningu wspomagającego dowodzenie podczas działań ratowniczych związanych z pożarami w budynkach wielokondygnacyjnych. Symulator taki od kilku lat jest na wyposażeniu Szkoły Głównej Służby Pożarniczej.

Symulowany pożar miał miejsce w pomieszczeniu hotelowym. Przewidziano dwa przypadki konfiguracji otworów wentylacyjnych. W pierwszym z nich drzwi wyjściowe z pomieszczenia były zamknięte, w drugim – otwarte. Modelowanie podobnego pożaru przeprowadzono również w programie Fire Dynamics Simulator i dokonano porównania wartości parametrów pożarowych wyznaczonych przy pomocy tego programu z parametrami, które uzyskano w symulatorze wspomagania dowodzenia.

**Słowa kluczowe:** wizualizacja pożaru, symulator do szkolenia i treningu, modelowanie pożaru, porównanie parametrów pożarowych

### Summary

The article presents description of smoke and fire visualization in simulator intended for training leadership during rescue operations of multi-storey buildings. The fire took place in a hotel room. There were prepared two cases according to configuration of ventilation. In the first case, the room exit doors were closed. In the second case, the same doors were opened. There was conducted modeling of similar fire in Fire Dynamics Simulator. Then the fire parameters appointed by FDS were compared and displayed by training leadership simulator.

**Keywords:** simulation of fire, simulator intended for training, fire modeling, comparison of fire parameters

## 1. Symulatory wirtualnej rzeczywistości

Symulatory są powszechnie stosowane w procesach kształcenia oraz doskonalenia zawodowego od ponad pięćdziesięciu lat [1, 2]. Pierwsze tego typu urządzenia powstały już podczas I wojny światowej. Oczywistym powodem ich stosowania, który aktualny pozostaje do dziś, jest ekonomia. Głównym celem trenerów komputerowych jest jak najdokładniejsze odzwierciedlenie środowiska pracy w wirtualnej rzeczywistości oraz umożliwienie uczestnikowi przećwiczenia w nim pożądaných umiejętności [3]. Państwowa Straż Pożarna rozpoczęła kilka lat temu prace nad wdrożeniem symulatorów do szkolenia strażaków [4].

## 2. Symulator wspomagający dowodzenie realizujący scenariusze akcji ratowniczych

Szkoła Główna Służby Pożarniczej od 2012 r. dysponuje symulatorem do szkolenia i treningu wspomagającego dowodzenie podczas działań ratowniczych związanych z pożarami w budynkach wielokondygnacyjnych. Program oferuje możliwość przeprowadzenia wybranego scenariusza akcji ratowniczo-gaśniczej, w warunkach wirtualnych, dla czterech przodowników rot oraz kierującego akcją ratowniczo-gaśniczą. Zjawiska rzeczywiste są odzwierciedlone dzięki zastosowaniu modeli matematycznych rozwoju pożaru oraz technik budowania scenariuszy. „System umożliwi kompleksową i zintegrowaną symulację różnego typu działań, w tym pojedynczych osób oraz związków taktycznych, z wykorzystaniem nowoczesnych technologii informatycznych” [5].

### 2.1. Stanowiska ćwiczących

W aktualnej konfiguracji szkolenie może być prowadzone dla pięciu osób, dla których przewidziano rolę kierującego działaniami ratowniczymi (KDR) oraz

czterech przodowników rot. Dla każdego przodownika roty przygotowano oddzielne stanowisko, składające się z ekranu LCD, na którym wyświetlany jest widok z perspektywy pierwszej osoby oraz manipulator dźwawkowy, przy pomocy którego przodownik steruje postacią wirtualną. Narzędzia pomiarowe wbudowane w program pokazują w czasie rzeczywistym:

- 1) zawartość w atmosferze tlenu  $O_2$ , wyrażoną w procentach;
- 2) temperaturę powietrza  $t$ , wyrażoną w stopniach skali Celsjusza;
- 3) zawartość w atmosferze tlenku węgla  $CO$ , wyrażoną w ppm;
- 4) zasięg widzialności VR, wyrażony w metrach.

Dla stanowiska KDR przewidziano dwa rzutniki wraz z wyprofilowanym ekranem projekcyjnym oraz manipulator o takim samym przeznaczeniu jak dla przodowników. Panoramiczny ekran zapewnia większy komfort ćwiczeń oraz ułatwia dostrzeganie. Rozwiązanie takie uwarunkowane jest przeznaczeniem symulatora, którego głównym celem jest szkolenie dowódców [6].

## **2.2. Stanowisko instruktora**

Programem zarządza instruktor. Przed nim znajduje się sześć ekranów LCD, mysz, klawiatura i manipulator dźwawkowy. Przy pomocy tych urządzeń instruktor przygotowuje i rozpoczyna scenariusz zdarzenia oraz modyfikuje go podczas ćwiczenia. Na ekranach stanowiska obserwuje działania przodowników oraz dowódcy, korzystając przy tym z dwuwymiarowej mapy. Instruktor może sterować przy pomocy manipulatora niewidzialną postacią, która posługuje się własną kamerą z widokiem, z perspektywy pierwszej osoby. Przechodząc do zakładki „scenariusz”, widać dynamicznie rozwijane menu, które zawiera trzy grupy zagadnień: poszkodowani, osoby postronne, symulacja ognia. Ostatnia z nich przedstawia następujące opcje modyfikacji: zadymienie, ustaw skuteczność gaszenia (dolną), ustaw skuteczność gaszenia (górną), parametry pożaru.


## **3. Sposób prowadzenia obserwacji**

W artykule opisano, jak przedstawiona jest graficznie symulacja dymu i płomieni oraz w jaki sposób zmieniają się wartości tlenu, temperatury, tlenku węgla i zasięgu widzialności, w zależności od odległości i położenia postaci względem pożaru. Obserwacje prowadzono ze stanowiska instruktora, posługując się kamerą postaci niewidocznej. Opisując obszar powierzchni lub objętość przestrzeni, z powodu braku sposobu pomiaru, posługiwano się przybliżoną oceną wizualną i porównywaniem wymiarów przedmiotów do wysokości pomieszczenia. Obserwację prowadzono, włączając scenariusz „blok”. Pomieszczenie, które zostało objęte wirtualnym pożarem, to największy, umeblowany pokój. W jego ścianie zewnętrznej znajduje się okno dwuskrzydłowe. Duży pokój połączono z korytarzem przedpokojem. Obserwację pożaru przeprowadzono w dwóch przypadkach: gdy drzwi prowadzące na kory-

tarz były zamknięte oraz gdy pozostały otwarte. Punkt, w którym rozpoczęto pożar, znajduje się tuż przy oknie, po przeciwległej stronie drzwi. Zadymienie w zakładce „scenariusz” pozostawiono jako wartość domyślną. W tej zakładce zastosowano również domyślne ustawienia parametrów pożaru. Wszystkie czasy mierzono od momentu rozpoczęcia pożaru.

#### 4. Faza I – spalanie bezpłomieniowe

Tabela 1. Faza I – spalanie bezpłomieniowe

Widok z pomieszczenia
Drzwi zamknięte / drzwi otwarte

<p><b>Rys.1.</b> Spalanie bezpłomieniowe po 30 s</p> <p>Źródło: zrzut ekranowy z symulatora.</p>

Początkowo, tuż nad podłogą, widać jasnopomarańczowe, przezroczyste obłoki wydobywające się z jednego punktu. Poruszają się powoli ku górze, a ich kolor zmienia się na ciemnoszary. W pomieszczeniu powstaje niewielka chmura, której całkowita objętość pozostaje stała w czasie. Pole poziomej powierzchni chmury wyraźnie zwiększa się wraz z wysokością nad ziemią. Dym nie podejmuje interakcji z otoczeniem, przenika przez przedmioty znajdujące się w pomieszczeniu. W czasie trwania tego etapu dym nie gromadzi się w strefie podsufitowej. Zjawisko to ma charakter powolny, zatem nie ma wątpliwości, iż mamy do czynienia ze spalaniem bezpłomieniowym, które przy ustawieniach domyślnych scenariusza trwa 1 min 30 s. W tym czasie słychać ciche syczenie, które jest oznaką rozwijającego się pożaru.

Widok z korytarza	
Drzwi zamknięte	Drzwi otwarte
	
<p><b>Rys. 2.</b> Spalanie bezpłomieniowe, widok z korytarza przy zamkniętych drzwiach po 1 min</p> <p>Źródło: zrzut ekranowy z symulatora.</p>	<p>Przez cały czas trwania spalania bezpłomieniowego nie widać wydobywającego się z otwartych drzwi dymu, co przy rzeczywistym pożarze wydaje się być niemożliwe. W sytuacji gdy drzwi prowadzące na korytarz są otwarte, uczestnik ćwiczący na symulatorze nie może stwierdzić obecności pożaru w danym pomieszczeniu.</p>
Widok z zewnątrz budynku	
Drzwi zamknięte / drzwi otwarte	
<p>Po umiejscowieniu kamery obserwatora tuż za szybą okna widać zarys poruszających się obłoków dymu w miejscu rozpoczęcia pożaru. Trudno określić ich kolor. Obserwując okna z poziomu osoby stojącej przed budynkiem, niemożliwe jest dostrzeżenie pożaru rozpoczynającego się wyżej niż na parterze.</p>	

Źródło: opracowanie własne.

## 5. Faza II – spalanie płomieniowe

### 5.1. Reprezentacja płomieni

Po upływie 1 min 30 s, następuje gwałtowna zmiana. Kolejny etap rozwoju pożaru sygnalizuje pojawienie się płomieni, a ich reprezentacja wygląda następująco. W miejscu, z którego poprzednio wydobywał się tylko dym, można zaobserwować „języki” i różnego kształtu skupiska pikseli koloru jaskrawo pomarańczowego. Prędkość unoszenia się płomieni generowanych przez program jest znacznie większa niż prędkość unoszenia się dymu. Zjawisko to zachodzi bardzo dynamicznie, nie pozostawiając wątpliwości, iż program symuluje zjawisko spalania płomieniowego. Pole powierzchni poziomej ognia jest największe tuż przy podłodze, stopniowo maleje wraz ze wzrostem wysokości. Płomienie, tak jak w przypadku dymu, „przenikają” przez meble, rozprzestrzeniają się niezależnie od rozmieszczenia mebli czy rodzajów materiałów palnych. Rozwój symulowanego pożaru w programie jest bardzo gwałtowny. Płomienie już po kilku sekundach osiągają wysokość pomieszczenia.



Rys. 3 Widok spalania płomieniowego, po 1 min 30 s

Źródło: zrzut ekranowy z symulatora.

Po upływie 1 min 30 s zauważyć można dodatkowo czarne chmury dymu. Pojawiają się one wyłącznie u góry płomienia. Od momentu pojawienia się płomieni dym zaczyna koncentrować się w strefie podsufitowej. Po 1 minucie 50 s zajmuje on całą objętość podsufitową. Jego gęstość, wraz z dalszym upływem czasu, nie zmienia się, a skupione w okręgi cząstki dymu przemieszczają się w danej objętości, sprawiając wrażenie, iż wirują.

## 5.2. Przebieg spalania płomieniowego

Tabela 2. Faza II – spalanie płomieniowe

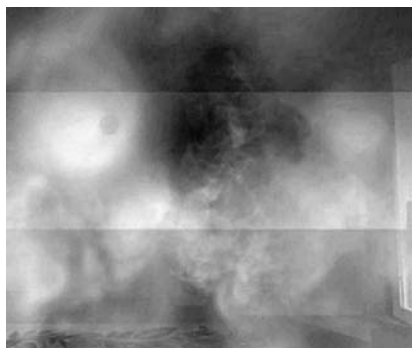
Widok z pomieszczenia	
Drzwi zamknięte	Drzwi otwarte
<p>Sytuacja, w której pomieszczenie oddzielone jest od korytarza drzwiami sprawia, iż wirtualny pożar oddaje cechy rzeczywistego spalania niecałkowitego. Grubość warstwy dymu unoszącego się w górnej części pomieszczenia zwiększa się z czasem. Po upływie około 2 min 30 s, rośnie zagęszczenie wirtualnego dymu oraz zajmuje on około połowę objętości pomieszczenia.</p> <p>Patrząc w górę, z poziomu obserwatora, trudno dostrzec kratkę wentylacyjną znajdującą się na suficie. Ilość dymu koloru jasnopomarańczowego w stosunku do dymu ciemnoszarego kształtuje się na podobnym poziomie. Czarne obłoki widać jedynie w górnej części płomienia, kolor pozostałego dymu wypełniającego pomieszczenie zbliża się jedynie do koloru czarnego. Płomienie nadal bardzo wyraźnie rysują się na tle dymu. Zajmowana przez nie powierzchnia pozostaje nieco większa niż powierzchnia spalania bezpłomieniowego, nieznacznie wykraczając poza określony punkt zarzewia. Ogień nie przenosi się na pozostałą powierzchnię pomieszczenia. Nigdzie w pokoju nie widać „okopcenia” powierzchni. Tuż po rozpoczęciu fazy spalania płomieniowego, pod sufitem pojawiają się pojedyncze płomienie poruszające się w kierunkach poziomych, co może być oznaką wypalania się gazów pożarowych. Po upływie 3 min 30 s, dym wypełnia całe pomieszczenie.</p>	<p>Kolejne obserwacje prowadzono w pomieszczeniu, w sytuacji gdy drzwi prowadzące z niego do przedpokoju i z przedpokoju na korytarz były otwarte. Celem tego działania było sprawdzenie, w jaki sposób swobodny przepływ powietrza wpłynie na rozwój symulowanego pożaru. Podobnie jak w sytuacji z zamkniętymi drzwiami, po około 2 min dym wypełnia całą objętość strefy podsufitowej. Cząstki dymu znajdujące się najbliżej ognia, tak jak poprzednio, przybierają kolor jasnopomarańczowy. Pojedyncze „języki” płomienia pojawiają się i zanikają w czasie około 1 s wraz z przemieszczaniem się w kierunku poziomym. Obserwując kolor dymu, czarne obłoki można dostrzec jedynie w pierwszych kilkunastu sekundach spalania płomieniowego, znacznie przeważa w całej objętości pomieszczenia dym jasnopomarańczowy. Wraz z upływem czasu warstwa dymu nie obniża się. Po upływie około 2 min 30 s, na wysokości równej około połowie pomieszczenia pojawiają się jasnopomarańczowe obłoki dymu rzadszego względem dymu znajdującego się powyżej.</p>



**Rys. 4.** Widok spalania płomieniowego, po upływie 2 min 30 s

Źródło: zrzut ekranowy z symulatora.

Wraz z upływem czasu, zdecydowanie przeważają w pomieszczeniu gęste obłoki koloru ciemnoszarego i czarnego, widoczność spada niemalże do zera. Jedynie pozycja leżąca zapewnia widoczność pozwalającą na określenie swojej pozycji i wydostanie się z pokoju. Podczas symulacji pożaru ze spalaniem płomieniowym słychać głośne trzaski oraz „huczenie”, które od razu przywodzą na myśl odgłosy wydobywające się ze spalanego materiału oraz falę dźwiękową towarzyszącą przemieszczaniu się płomienia.



**Rys. 5.** Widok spalania płomieniowego, po upływie 3 min 30 s

Źródło: zrzut ekranowy z symulatora





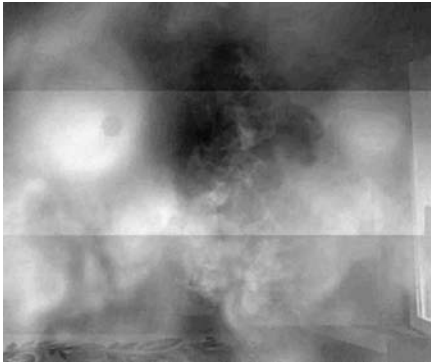
**Rys.6.** Spalanie płomieniowe, po upływie 2 min 30 s

Źródło: zrzut ekranowy z symulatora.

Widoczność w pomieszczeniu jest dosyć dobra przez cały czas trwania pożaru. Dym skumulowany w strefie podsufitowej sprawia wrażenie „wirowania”, jednak nic nie wskazuje na to, aby przemieszczał się w stronę otwartych drzwi. Po upływie około 3 min 20 s, podłoga wokół miejsca powstawania płomieni staje się zupełnie czarna. Są to jedyne oznaki „okopcenia” zaobserwowane na etapie spalania płomieniowego.



<b>Widok z korytarza</b>	
<b>Drzwi zamknięte</b>	<b>Drzwi otwarte</b>
<p>Przez cały czas rozwoju pożaru w pomieszczeniu animacja dymu na korytarzu pozostaje taka sama jak ta na etapie spalania bezpłomieniowego.</p>	<p>Obserwator znajdujący się na korytarzu ma przed sobą widok na połowę jego długości. Pierwsze oznaki dymu zaobserwowano po około 2 min.</p>  <p><b>Rys. 7.</b> Widok spalania płomieniowego z korytarza, po upływie 2 min</p> <p>Źródło: zrzut ekranowy z symulatora.</p>
	 <p><b>Rys. 8.</b> Widok spalania płomieniowego z korytarza, po upływie 2 min 20 s</p> <p>Źródło: zrzut ekranowy z symulatora.</p> <p>Dym wydobywa się przez około 0,25 powierzchni otworu drzwiowego w jego górnej części. Kolor dymu jest jasnoszary a gęstość jego jest mniejsza niż dymu, który koncentruje się w strefie podsufitowej. Na początku zanika tuż przy suficie, nie rozprzestrzeniając się na dalsze części korytarza. Jego prędkość jest względnie duża w porównaniu z pręd-</p>

	<p>kością dymu wydobywającego się spod zamkniętych drzwi. Sugeruje to, iż pożar jest bardzo rozwinięty. Po około 2 min 20 s, na klatce schodowej o wysokości większej niż wysokość korytarza pojawia się chmura dymu koloru jasnoszarego.</p> <p>Nie było to poprzedzone ruchem cząsteczek dymu w strefie podsufitowej korytarza. Obłok dymu pojawia się tuż przy progu przejścia, unosi się do strefy podsufitowej klatki schodowej i tam zanika. Po czasie około 3 min 40 s w strefie podsufitowej korytarza zaczynają koncentrować się obłoki. Po upływie 4 min, dym osiąga swoją maksymalną gęstość w strefie podsufitowej. Od czasu jego pojawienia widać wyraźne ruchy wirowe.</p>
<b>Widok z zewnątrz budynku</b>	
<b>Drzwi zamknięte</b>	<b>Drzwi otwarte</b>
 <p>Rys. 9. Widok spalania płomieniowego z zewnątrz budynku, po 1 min 50 s</p> <p>Źródło: zrzut ekranowy z symulatora.</p> <p>Kamerę obserwatora umiejscowiono na zewnątrz budynku na poziomie ratowników. Od momentu rozpoczęcia się spalania płomieniowego widać za oknem wyraźnie płomienie. Po około 1 min 50 s, zaobserwowano jaskrawo</p>	<p>Trudno jest dostrzec różnice, obserwując okno pomieszczenia objętego pożarem w sytuacji, gdy drzwi są otwarte. Ogień pojawia się również po upływie 1 min 50 s. W pobliżu płomieni unosi się dym, wyglądający tak samo jak w przypadku, gdy drzwi pomieszczenia są zamknięte. Kolory, które można dostrzec z pozycji ratownika znajdującego się na zewnątrz budynku, wyglądają bardzo podobnie. Szyby tak jak poprzednio posiadają liczne uszkodzenia.</p>

pomarańczowy płomień kontrastujący z kolorem elewacji, zatem łatwo jest dostrzec miejsce spalania, gdy płomień ukazuje się w świetle okna.

Ogień w pomieszczeniu nie rozświetla pomieszczenia, jednak dym generowany w okolicy płomienia także przybiera barwę jasnopomarańczową. Sprawia to, iż patrząc z kamery umiejscowionej pod ostrym kątem względem okna, bez trudu zauważyć można jasnopomarańczowe kłęby.



**Rys. 10.** Widok spalania płomieniowego z zewnątrz budynku po 2 min

Źródło: zrzut ekranowy z symulatora.



**Rys. 11.** Widok spalania płomieniowego z zewnątrz po upływie 4 min 10 s

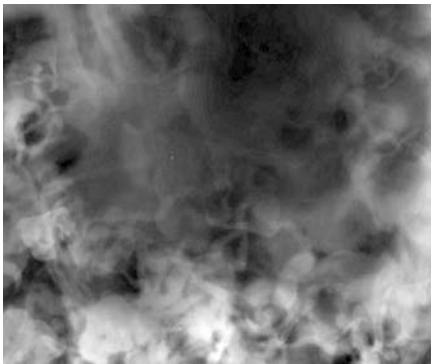
Źródło: zrzut ekranowy z symulatora.


<p>W czasie trwania fazy, II szyby pozostają tak samo przezroczyste, jednak po około 3 min 50 s pojawiają się na nich niewielkie „pęknięcia” przedstawione jako szare linie o różnych kształtach. Po upływie 4 min 10 s na szybach widać już długie, szare linie. Nie pojawiają się żadne ślady mogące sugerować „okopcenie”.</p>	
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--


Źródło: opracowanie własne.

## 6. Faza III – rozgorzenie

Tabela 3. Faza III – rozgorzenie

Widok z pomieszczenia	
Drzwi zamknięte	Drzwi otwarte
 <p><b>Rys. 12.</b> Widok rozgorzenia, po upływie 4 min 15 s</p> <p>Źródło: zrzut ekranowy z symulatora.</p> <p>Rozwój pożaru niedotlenionego oddaje symulator w przypadku zamkniętego pomieszczenia. Po upływie 4 min 15 s, płomień pojawiają się w całej objętości. Obserwator znajdujący się w pomieszczeniu widzi na ekranie jaskrawo pomarańczowe, szybko poruszające się płomienie. Wymieszane są one z dymem o różnych kolorach. Obłoki poruszają się z podobną prę-</p>	<p>Sytuacja, gdy drzwi pomieszczenia są otwarte, znacznie się różni wizualizacją pożaru. Dym nie jest w stanie wypełnić całego pomieszczenia z racji swobodnego przepływu powietrza, skumulowany jest jedynie w strefie podsufitowej. Po upływie 4 min 15 s następuje rozgorzenie. Czas ten jest taki sam jak w przypadku pokoju z zamkniętymi drzwiami. Oznacza to, iż parametry pożaru po danym czasie są identyczne w obu przypadkach. Widok pomieszczenia, w którym zachodzi zjawisko rozgorzenia, nie różni się od opisywanego poprzednio.</p>

<p>kością do prędkości płomieni. Widok pomieszczenia przesłaniają kłęby barwy jasnopomarańczowej, ciemnoszarej, czarnej oraz o podobnych im odcieniach.</p> <p>Kierując kamerę ku górze, można zaobserwować jedynie różnokolorowe obłoki dymu, niemożliwe jest dostrzeżenie powierzchni sufitu. Nie znając wcześniej układu pomieszczenia, niezwykle trudno się z niego wydostać. Wszystkie elementy pomieszczenia od początku zjawiska rozgorzenia pozbawione są kolorów. Jednocześnie wszystkie meble zachowują w warunkach pożaru kształty początkowe. Zjawisko rozgorzenia zachodzi dynamicznie, jego charakterystyka pozostaje jednak wraz z dalszym upływem czasu taka sama. Odgłosy pożaru są jeszcze bardziej spotęgowane w stosunku do spalania płomieniowego. Znacznie większa jest ich dynamika, głośność pozostaje na podobnym poziomie.</p>	
<b>Widok z korytarza</b>	
<b>Drzwi zamknięte</b>	<b>Drzwi otwarte</b>
<p>Rozpoczęcie fazy rozgorzenia w pomieszczeniu zamkniętym powoduje pojawienie się płomieni wydostających się z drzwi. Razem z nimi nadal wydobywa się dym o różnych odcieniach koloru szarego.</p>	 <p><b>Rys.13.</b> Widok rozgorzenia z korytarza po upływie 4 min 15 s</p> <p>Źródło: zrzut ekranowy z symulatora.</p>

	<p>Obserwując z korytarza otwarte drzwi pomieszczenia, w którym zachodzi rozgorzenie, widać wydostające się wraz z dymem płomienie. Ponadto w całym świetle drzwi obserwuje się dynamiczne płomienie i mieszające się z czarnymi kłęбами. Obserwator znajdujący się na korytarzu nie ma zatem wątpliwości, iż w pokoju zachodzi zjawisko rozgorzenia.</p>
<b>Widok z zewnątrz budynku</b>	
<b>Drzwi zamknięte</b>	<b>Drzwi otwarte</b>
<p>Rozpoczęcie fazy rozgorzenia widać z zewnątrz budynku bardzo wyraźnie. W poprzedniej fazie pożaru widać było ogień wydobywający się z jednego punktu oraz kłęby jasnopomarańczowego dymu dookoła. Po upływie około 4 min 15 s, w oknie okazują się na przemian płomienie na czarnym tle lub jasnopomarańczowe kłęby dymu. Po upływie 4 min 50 s, na szybie pojawia się jeszcze więcej linii oznaczających pęknięcia, a po kilku sekundach prawie cała powierzchnia szyby zanika. Brak jest animacji pokazującej odpadanie kawałków szkła. Wewnątrz ram okien widać pozostałości szkła o ostro zakończonych krawędziach. W tym samym momencie ogień z dymem gwałtownie wydostają się na zewnątrz.</p>	<p>Rozgorzenie widziane z zewnątrz budynku wykazuje w tym przypadku takie same cechy, jak w sytuacji gdy drzwi pokoju są zamknięte.</p>
	
<p><b>Rys. 14.</b> Widok rozgorzenia z zewnątrz budynku, po upływie 4 min 15 s</p>	
<p>Źródło: zrzut ekranowy z symulatora.</p>	

Źródło: opracowanie własne.

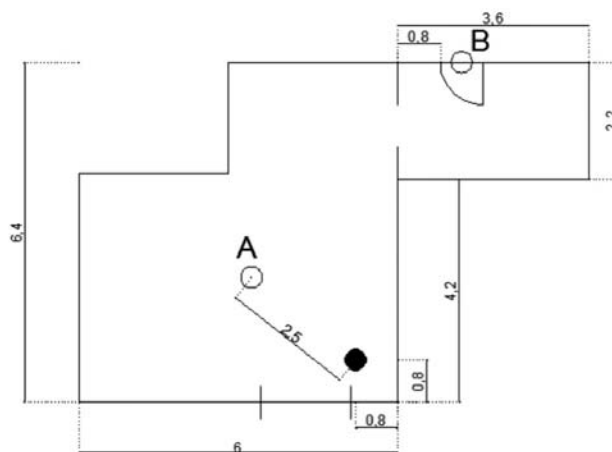
## 7. Przedstawienie symulacji pożaru przez program Fire Dynamics Simulator

Fire Dynamics Simulator (FDS) jest oprogramowaniem opracowanym przez Narodowy Instytut Standardów i Technologii Departamentu Handlu Stanów Zjednoczonych. Przy pomocy modelu Computational Fluid Dynamics (CFD) rozwiązuje on równania opisujące zjawiska fizykochemiczne zachodzące podczas pożaru. Dane wyjściowe to szereg parametrów opisujących warunki pożarowe w wybranym punkcie określonej płaszczyzny poziomej.

Posługując się programem FDS odtworzono model pożaru pomieszczenia, takiego samego, jak w symulatorze do szkolenia i treningu wspomagającego dowodzenie. Celem tego było porównanie wartości:

- zawartości tlenu w powietrzu,
- zawartości tlenku węgla w powietrzu,
- temperatury powietrza,
- zasięgu widzialności,

reprezentowanych przez oba symulatory w czasie trwania pożaru. Wartości mierzone były w tych samych momentach, które wyznaczały charakterystyczne punkty rozwoju pożaru w symulatorze wspomagającym dowodzenie.



Rys. 15. Szkic pomieszczenia z zaznaczonymi punktami pomiarowymi

Źródło: opracowanie własne.

Przeprowadzono pomiary porównawcze wysokości różnych przedmiotów oraz osób, tak aby otrzymać przybliżone wymiary pomieszczenia. Dobrano także odpowiednią moc pożaru, uwzględniając znajdujące się w pokoju materiały palne. Dzięki temu otrzymane wyniki można było zestawić z wartościami reprezentowanymi przez symulator wspomagający dowodzenie. Okrąg wypełniony kolorem czarnym symbolizuje ognisko pożaru. Wybrano następujące punkty pomiarowe, które obrano na płaszczyźnie poziomej znajdującej się na wysokości 1,8 m:

- A – w odległości 2,5 m od ogniska pożaru,
- B – w drzwiach wyjściowych na korytarz.

Dla pożaru w pomieszczeniu przy zamkniętych drzwiach wyjściowych pomiarów dokonano w momentach:

- 00:00 – rozpoczęcie pożaru,
- 01:30 – rozpoczęcia spalania płomieniowego,
- 02:00 – dym przesłania całą powierzchnię sufitu,
- 02:30 – warstwa dymu sięga połowy wysokości pomieszczenia,
- 03:30 – dym zajął całą objętość pomieszczenia,
- 04:15 – rozpoczęcie rozgorzenia.

Pożar w pomieszczeniu przy otwartych drzwiach wyjściowych przebiegał inaczej. Warstwa dymu nie wypełniła całej wysokości pomieszczenia. Pomiarów dokonano w następujących momentach:

- 00:00 – rozpoczęcie pożaru,
- 01:30 – rozpoczęcia spalania płomieniowego,
- 02:00 – dym przesłania całą powierzchnię sufitu,
- 02:30 – warstwa dymu sięga połowy wysokości pomieszczenia,
- 04:15 – rozpoczęcie rozgorzenia.

W tabelach 4-7 zestawiono parametry: zawartości tlenu i tlenku węgla w powietrzu, temperatury powietrza oraz zasięgu widzialności. Jednostki normowe, reprezentowane w programie FDS dostosowano do tych, wyświetlanych przez symulator.

**Tabela 4.** Pomiary w punkcie A, przy zamkniętych drzwiach wyjściowych

Czas [min]	Symulator wspomagający dowodzenie				FDS			
	O <sub>2</sub> [%]	T [°C]	CO [ppm]	VR [m]	O <sub>2</sub> [%]	T [°C]	CO [ppm]	VR [m]
00:00	21	22	0	10	21	22	0	30
01:30	21	120	0,1	9,9	9	300	2000	1,5
02:00	21	120	13	6,6	9	300	2000	1,5
02:30	21	129	51,6	3,8	7,5	300	2200	1,5
03:30	21	174	201	0	8	300	2000	1,5
04:15	21	494	811	0	9	300	2000	1,5

Źródło: opracowanie własne.

**Tabela 5.** Pomiary w punkcie B, przy zamkniętych drzwiach wyjściowych

Czas [min]	Symulator wspomagający dowodzenie				FDS			
	O <sub>2</sub> [%]	T [°C]	CO [ppm]	VR [m]	O <sub>2</sub> [%]	T [°C]	CO [ppm]	VR [m]
00:00	21	22	0	10	21	22	0	30
01:30	21	22	0	10	16	100	800	1,5
02:00	21	44	4,7	7,9	13	100	1200	1,5
02:30	21	45	31	4,8	12	100	1400	1,5
03:30	20	112	205	0	10	100	1800	1,5
04:15	20	449	811	0	9	100	2000	1,5

Źródło: opracowanie własne.



**Tabela 6.** Pomiary w punkcie A, przy otwartych drzwiach wyjściowych

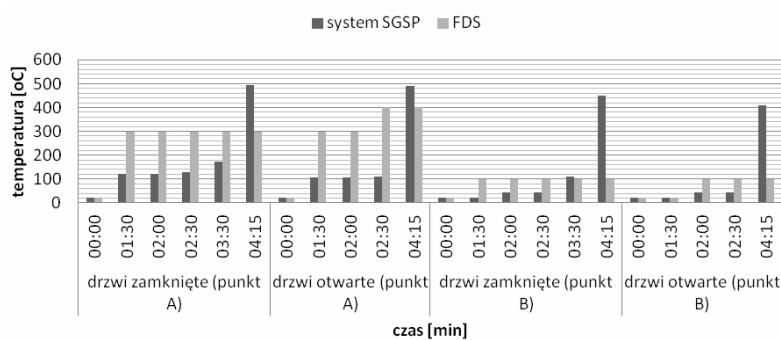
Czas [min]	Symulator wspomagający dowodzenie				FDS			
	O <sub>2</sub> [%]	T [°C]	CO [ppm]	VR [m]	O <sub>2</sub> [%]	T [°C]	CO [ppm]	VR [m]
00:00	21	22	0	10	21	22	0	30
01:30	21	108	0,2	9,8	13	300	1400	1,5
02:00	21	108	11,9	6,5	13	300	1400	1,5
02:30	21	110	29,8	6,4	9	400	2000	1,5
04:15	21	491	803	6,4	6	400	2400	1,5

Źródło: opracowanie własne.

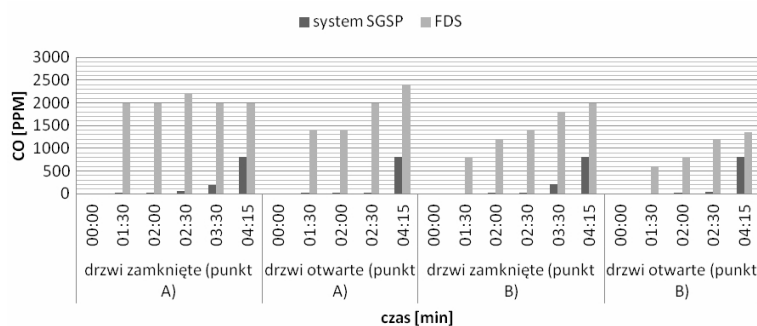
**Tabela 7.** Pomiary w punkcie B, przy otwartych drzwiach wyjściowych

Czas [min]	Symulator wspomagający dowodzenie				FDS			
	O <sub>2</sub> [%]	T [°C]	CO [ppm]	VR [m]	O <sub>2</sub> [%]	T [°C]	CO [ppm]	VR [m]
00:00	21	22	0	30	21	22	0	30
01:30	21	22	0	1,5	17	22	600	1,5
02:00	21	44	8,5	1,5	16	100	800	1,5
02:30	21	44	40,4	1,5	14	100	1200	1,5
04:15	21	410	811	1,5	13	100	1350	1,5

Źródło: opracowanie własne.

**Wykres 1.** Pomiary temperatury na wysokości 1,8 m

Źródło: opracowanie własne.

**Wykres 2.** Pomiary zawartości tlenku węgla w powietrzu na wysokości 1,8 m

Źródło: opracowanie własne.

## Podsumowanie

Symulator wspomagający dowodzenie, opracowany dla Szkoły Głównej Służby Pożarniczej, wprowadza innowacyjną metodę nauczania strażaków. Jego przeznaczeniem jest szkolenie wspomagające dowodzenie, jednak odpowiednio organizując zajęcia, można przetrenować także umiejętności komunikacji, pracy w zespole czy rozwiązywania nowych problemów. Aby osiągnąć maksymalną efektywność nauczania, symulator powinien spełniać pewne warunki. Istotnym aspektem jest odpowiednie odwzorowanie zjawisk zachodzących w środowisku. Każda symulacja przedstawia pewne uproszczenia, gdyż niemożliwe jest przedstawienie w formie wizualnej dokładnego modelu przebiegu zjawisk pożarowych. Strażak, poprzez obserwacje otoczenia, buduje zamiar taktyczny i podejmuje decyzje. W niniejszym artykule opisano wizualizację dymu i płomieni. Następnie porównano parametry pożarowe reprezentowane w symulatorze z parametrami wyznaczonymi metodami naukowymi. Oceniając poprawność symulacji prezentowanej przez symulator wspomagający dowodzenie, należy przeanalizować zastosowane uproszczenia oraz ustalić, czy są one akceptowalne w procesie dydaktycznym.

Warunki panujące w pomieszczeniu miały wpływ na przebieg zjawiska. Otwarcie drzwi wyjściowych zmieniło charakterystykę pożaru. Dym nie zdołał wypełnić całej objętości pomieszczenia. Jednak czas rozpoczęcia rozgorzenia, w przypadku gdy drzwi pomieszczenia były otwarte, był taki sam, jak w przypadku, gdy drzwi były zamknięte. Logika programu zakłada, że szybkość wymiany powietrza w pomieszczeniu objętym pożarem nie ma wpływu na czas potrzebny do osiągnięcia rozgorzenia.

Jednym z aspektów symulacji, które ma duże znaczenie w dydaktyce, jest wizualizacja oznak pożaru. Obserwując drzwi wejściowe do pomieszczenia z korytarza, animacja dymu pozostawała przez cały czas taka sama, od momentu rozpoczęcia spalania, aż do chwili, w której nastąpiło rozgorzenie. Z pozycji osoby znajdującej się na korytarzu, nie można zatem ocenić, w której fazie znajduje się pożar. W sytuacji gdy pomieszczenia są otwarte, animacja przebiega dwuetapowo. Na początku dym unosi się w górnej części, następnie pojawia się w strefie podsufitowej. Pozwala to obserwatorowi stwierdzić, iż pożar znajduje się w rozwiniętej fazie, jednak nadal nie posiada on możliwości analizowania sytuacji.

Kolejnym aspektem był zasięg widzialności w pomieszczeniu. Cząsteczki dymu zaczynały koncentrować się dopiero podczas spalania płomieniowego. Proces ten postępował płynnie, zmiany były łatwo dostrzegalne. Rzeczywista odległość widzenia obserwatora malała wraz z upływem czasu. Podczas gdy zasięg widzialności według wskaźnika symulatora wynosił 2 m, orientacja w przestrzeni stwarzała znaczne trudności. Sposób, w jaki cząsteczki dymu utrudniały widoczność, można uznać za akceptowalny w warunkach szkolenia prowadzonego na symulatorze.

Symulacja nie odtwarzała natomiast takich zjawisk, jak okopcenia w okolicy drzwi wejściowych, deformacja powierzchni materiałów, przepalenie drzwi wejściowych. Program wizualizował podstawowe zjawiska zachodzące podczas pożaru. Jednakże są one na tyle zróżnicowane i zależne od warunków otoczenia, iż spełniają swoją rolę w procesie dydaktycznym.

Parametry pożaru wyznaczone przez oba symulatory znacznie różniły się już od momentu rozpoczęcia spalania. Program FDS wyznaczył duże wyższe temperatury powietrza w punktach pomiarowych. Po upływie 1 min 30 s temperatura wynosiła 300°C w odległości 2,5 m od ogniska pożaru w obu przypadkach (gdy drzwi wyjściowe były zamknięte i otwarte). Symulator wspomagający dowodzenie szacował wtedy tę wartość na nieco ponad 100°C. Nagły skok temperatury w przypadku symulatora wspomagającego dowodzenie do wartości sięgającej niemal 500°C związany był z wystąpieniem zjawiska rozgorzenia. Wszelkie parametry wyznaczone przy pomocy FDS świadczyły o tym, iż czas potrzebny do zapalenia wszystkich powierzchni palnych powinien być znacznie dłuższy.

Zawartość tlenu węgla w powietrzu reprezentowana była przez oba programy w postaci cząsteczek CO przypadających na 1 mln cząsteczek powietrza. W tym przypadku wartości te trudno do siebie odnieść. Symulator wspomagający dowodzenie do czasu 2 min, w odległości 2,5 m od ogniska pożaru, nie wykazywał obecności CO na wysokości 1,8 m w każdym z przypadków. Program FDS, w przypadku gdy drzwi pomieszczenia były zamknięte, określił zawartość CO w tej samej odległości na 1400 ppm. Tak duża rozbieżność w otrzymanych wartościach nie jest dopuszczalna. Zawartość tlenu węgla w powietrzu była najmniej zróżnicowana podczas symulacji w symulatorze wspomagającym dowodzenie. Jej maksymalna wartość wyniosła nieco ponad 800 ppm w momencie rozpoczęcia rozgorzenia. Dostawca symulatora zaznacza, że model rozwoju pożaru i rozprzestrzeniania się dymu jest uproszczony [7].

Student podczas szkolenia na symulatorze wspomagającym dowodzenie obserwuje w górnym rogu ekranu reprezentowane przez program parametry pożaru. Funkcja ta zastępuje rzeczywiste odczuwanie temperatury oraz obserwacje wskazań urządzeń pomiarowych przez ratownika. Wartości temperatury powietrza otrzymane przy zastosowaniu modelu opracowanego przez Narodowy Instytut Standardów i Technologii Departamentu Handlu Stanów Zjednoczonych są znacznie wyższe. Student, posługując się informacjami, jakie zdobył podczas obserwacji i pomiarów, podejmuje stosowne działania. Niemal dwukrotnie wyższa temperatura odczuwana w okolicy drzwi może znacząco wpłynąć na dalszy przebieg akcji ratowniczo-gaśniczej. FDS obliczył niemal trzykrotnie wyższą temperaturę powietrza w odległości 2,5 m od ogniska pożaru.

## Literatura

- [1] Ortloff R.C.: Training Approaches for Using Simulators to Teach Process Control Systems, *Plant Engineering* 2010, nr 11, s. 11-14.
- [2] Konwerski M.: Segmentacja i perspektywy rozwoju rynku gier symulatorów samolotowych w Polsce, Uniwersytet Rzeszowski, Rzeszów, 2012.
- [3] Bartnik R., Grenda B., Galej P.: Symulatory lotu oraz symulatory kontroli ruchu lotniczego w szkoleniu lotniczym, Akademia Obrony Narodowej, Warszawa, 2014.
- [4] Rogulski J., Wantoch-Rekowski R.: Zastosowanie symulacji wirtualnej w zakresie szkolenia operatorów bezałogowych platform lądowych wykorzystywanych do działań ratowniczo-gaśniczych, *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza* 2014, nr 4, s. 113-125.
- [5] Wantoch-Rekowski R.: Programowalne środowisko symulacji wirtualnej, PWN, Warszawa, 2013.
- [6] ETC-PZL Aerospace Industries Sp. z o.o.: Opracowanie i wdrożenie symulatora do szkolenia i treningu wspomagającego dowodzenie podczas działań ratowniczych związanych z pożarami w budynkach wielokondygnacyjnych i wypadkami komunikacyjnymi, Warszawa, 2012.
- [7] ETC-PZL Aerospace Industries Sp. z o.o.: Raport końcowy z realizacji projektu rozwojowego własnego, Warszawa, 2012.