

mł. kpt. mgr inż. Mariusz BARAŃSKI

Komenda Powiatowa Państwowej Straży Pożarnej w Oławie

dr hab. inż. Tadeusz MACIAK, profesor SGSP

WIBP, Katedra Techniki Pożarniczej, Zakład Informatyki i Łączności SGSP

## **Analiza rozwoju pożarów i ewakuacji wybranych fragmentów budynku wysokościowego przy zastosowaniu Fire Dynamics Simulator + Evac**

### ***Analysis of the Development of the Fires and the Evacuation of Some Parts of the High Rise Building, using the Fire Dynamics Simulator + Evac***

#### **Streszczenie**

W artykule zaprezentowano możliwości zastosowania oprogramowania CFD do prognozowania rozprzestrzeniania się pożaru w budynkach wysokościowych, wyposażonych w systemy kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła oraz w stałe urządzenia gaśnicze. Do modelowania wykorzystano program Fire Dynamics Simulator (FDS) – jedno z wiodących narzędzi CFD przeznaczonych do symulowania zagrożeń spowodowanych rozwojem pożarów. Wyniki uzyskane na podstawie modelowania, tj. temperatura, zasięg widzialności, stężenia toksycznych gazów pożarowych, pozwalają na określenie dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji. Natomiast wyniki otrzymane przy zastosowaniu rozszerzenia Evac, modelującego czas przejścia ludzi drogami ewakuacyjnymi, prowadzą do określenia wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji. Dostępny i wymagany czas bezpiecznej ewakuacji to jedne z kluczowych parametrów stosowanych w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. W artykule przedstawiono wyniki przeprowadzonego modelowania pożarów w wybranych fragmentach budynku wysokościowego. Pierwszy fragment to kondygnacja zakwalifikowana do kategorii zagrożenia ludzi ZLIV. Drugi fragment, to punkt widokowy zlokalizowany na ostatniej kondygnacji – zakwalifikowany do kategorii ZLIII. Dokonano porównania rozwoju pożarów przy braku instalacji i systemów przeciwpożarowych oraz przy wyposażeniu budynku w odpowiednie systemy. Wykazano, że program FDS jest narzędziem pozwalającym na weryfikację działania instalacji i systemów przeciwpożarowych jeszcze na etapie projektowania budynków.

**Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo w budynkach, ewakuacja ludności, szacowanie czasu ewakuacji



### Summary

The article presents the applicability of CFD software to predict the spread of fire in high-rise buildings equipped with systems to control the spread of smoke and heat and the fixed fire-extinguishing system. To the modeling, we used the Fire Dynamics Simulator Program, one of the leading CFD tools for simulating hazards caused by the development of fires. The results obtained on the basis of modeling, ie. the temperature, range of the concentrations of toxic fumes, allow to determine the time available for safe evacuation. In contrast, the results obtained while using the extension Evac, modeling the transition time of people escape routes lead to determine the required safe evacuation times. Available and the required safe evacuation time is one of the key parameters used in fire safety engineering. The article presents results of the modeling of fires in some parts of the high rise building. The first fragment is a storey qualified for the ZLIV hazard category of people. The second fragment is a sightseeing point located on the top floor and classified as the ZLIII hazard category. A comparison was made considering the fire development, both, with the lack of fire installation and fire protection systems and with the presence of all appropriate systems being installed. It has been shown that the FDS program is a tool for verification of the installation and fire protection systems as early as at the stage of buildings design.

**Keywords:** safety in buildings, people evacuation, estimating the evacuation time

### Wstęp

Rozbudowa miast sprawia, że architekci i inwestorzy projektują i wznoszą coraz to wyższe budynki mogące pomieścić biura, siedziby firm, sklepy, lokale usługowe lub mieszkania. W ostatnich latach w największych polskich miastach powstało kilka budynków wysokościowych. Do budynków wysokościowych zaliczamy budynki o wysokości przekraczającej 55 m od poziomu terenu przy najniższej położonym wejściu do budynku lub jego części do górnej płaszczyzny stropu bądź najwyższej położonej krawędzi stropodachu nad najwyższą kondygnacją użytkową [1]. W tabeli 1 zestawiono budynki wysokościowe oddane w Polsce do użytku po 2007 roku.

Powstałe w budynkach wysokościowych pożary stanowią bardzo poważne zagrożenie dla życia i zdrowia wielu osób. Cechują się szybkim rozwojem pożaru spowodowanym jego rozprzestrzenianiem się w górę budynku, na kolejne piętra. Powodują zadymienie pionowych i poziomych dróg ewakuacyjnych, co w konsekwencji utrudnia lub uniemożliwia prowadzenie bezpiecznej ewakuacji. W ostatnim stuleciu doszło do bardzo tragicznych pożarów w budynkach wysokościowych, w których zginęło wiele osób. Najbardziej tragiczne, to pożary w Joelma Building (Brazylia, 1974), gdzie zginęło 179 osób oraz w Taeyôn'gak Hotel (Korea Południowa, 1971), gdzie zginęło 163 osoby. Po tych doświadczeniach zwiększono wysiłki mające na celu poprawę bezpieczeństwa w budynkach wysokości-



wych. Postęp nastąpił zarówno w biernych, jak i czynnych zabezpieczeniach przeciwpożarowych. Do jednych z ważniejszych zabezpieczeń należy zaliczyć stałe urządzenia gaśnicze tryskaczowe oraz systemy kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła.

**Tabela 1.** Budynki wysokościowe w Polsce oddane do użytku po 2007 roku [2]

Lp.	Nazwa budynku	Lokalizacja	Wysokość całkowita	Rok ukończenia budowy
1	Centrum Biurowe Neptum	Gdańsk, ul. Grunwaldzka 103a	85 m	2014
2	Cztery Wieże	Katowice, ul. Chorzowska 216	72 m	2014
3	Plac Unii	Warszawa, ul. Puławska 2	90 m	2013
4	Cosmopolitan	Warszawa, ul. Twarda 2/4	160 m	2013
5	Złota 44	Warszawa, ul. Złota 44	192 m	2013
6	Centrum Kliniczno-Dydaktyczne Uniwersytetu Medycznego w Łodzi	Łódź, ul. Czechosłowacka 8/10	72 m	2013
7	Sky Tower	Wrocław, ul. Powstańców Śląskich 95	212 m	2012
8	JM Tower	Warszawa, ul. Grzybowska 45	92 m	2011
9	Platinum Towers	Warszawa, ul. Grzybowska 59/61	85 m	2009
10	Sea Towers	Gdynia, ul. Hryniewickiego 6	141,6 m	2009
11	North Gate	Warszawa, ul. Bonifraterska 17	94 m	2008

Ostatnie pożary, które miały miejsce w budynkach wysokościowych nie są tak dramatyczne, jak te przytoczone powyżej. Najważniejsze z nich to, m.in.: Tower Skyscraper, Dubai, 21 lutego 2015 – brak ofiar, Lotus Business Park, Indie, 18 lipca 2014 – brak ofiar, Great Nigeria Insurance House, Nigeria, 4 listopada 2013 – 6 ofiar.



**Rys. 1.** Pożar Tower Skyscraper [3]



Zapewnienie bezpieczeństwa, a w szczególności bezpieczeństwa ewakuacji w budynkach, jest uregulowane przepisami prawa europejskiego oraz krajowego, których zestawienie autorzy przedstawili w publikacji [4]. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury [1] w § 246.2 wprowadza wymaganie wyposażenia klatek schodowych i przedsionków przeciwpożarowych stanowiące drogę ewakuacyjną w budynkach wysokich dla stref pożarowych innych niż ZLIV i PM oraz budynkach wysokościowych w urządzenia zapobiegające ich zadymieniu. Z kolei § 270 wspomnianego rozporządzenia określa wymagania, jakie powinna spełniać instalacja wentylacji oddymiającej. Przy projektowaniu oraz realizacji postanowień rozporządzenia przeważnie zastosowanie ma norma PN-EN 12101-6 „Systemy kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła – Część 6: Wymagania techniczne dotyczące systemów różnicowania ciśnień – Zestawy urządzeń” [5] oraz Instrukcja nr 378/2002 ITB [6].

## **1. Wymagania dla systemu kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła**

W budynku wysokościowym drogi ewakuacyjne mogą być zabezpieczone przed zadymieniem przez system kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła zgodny z normą PN-EN 12101-6 [5]. Po zainstalowaniu system musi przejść szeregi rygorystycznych testów i prób potwierdzających jego prawidłowe działanie. Norma definiuje sześć klas systemów oznaczonych odpowiednio: A, B, C, D, E, F. System klasy A – dla środków ewakuacji przeznaczony jest dla budynków, w których nie zakłada się ewakuacji ogólnej. Procedury dopuszczają ewakuację osób bezpośrednio zagrożonych. System klasy B – do celów ewakuacji i prowadzenia drogami ewakuacyjnymi akcji gaśniczej. System zabezpiecza przed zadymieniem szyby wind i klatki schodowe podczas prowadzenia akcji gaśniczej przy otworzonych drzwiach na kondygnację objętą pożarem. System klasy C – do celów ewakuacji równoczesnej. System zakłada, że po ogłoszeniu alarmu pożarowego wszyscy użytkownicy budynku będą ewakuowani równocześnie. System klasy D – do ewakuacji z budynków, których użytkownicy śpią, np.: hotele, akademiki. System klasy E – do celów ewakuacji stopniowej. W systemie tym zakłada się, że użytkownicy budynku po ogłoszeniu alarmu pożarowego będą ewakuowani stopniowo, zgodnie z przyjętymi zasadami. System klasy F – dla celów wspomagania ekip ratowniczych i prowadzenia ewakuacji.

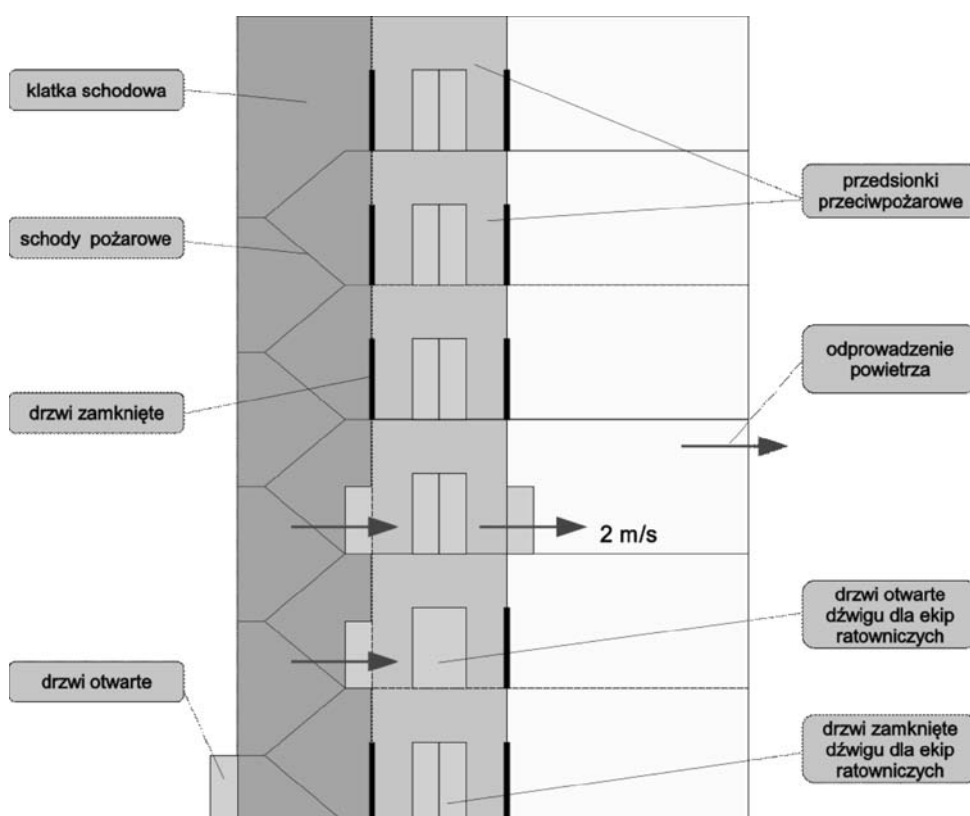
Najczęściej stosowanym systemem w budynkach wysokościowych jest system klasy B. Zgodnie jego specyfikacją, musi spełniać następujące minimalne wymagania:

- różnica ciśnień między szybem dźwigu ratowniczego, a powierzchnią użytkową – 50 Pa,
- różnica ciśnień między klatką schodową, a powierzchnią użytkową – 50 Pa,



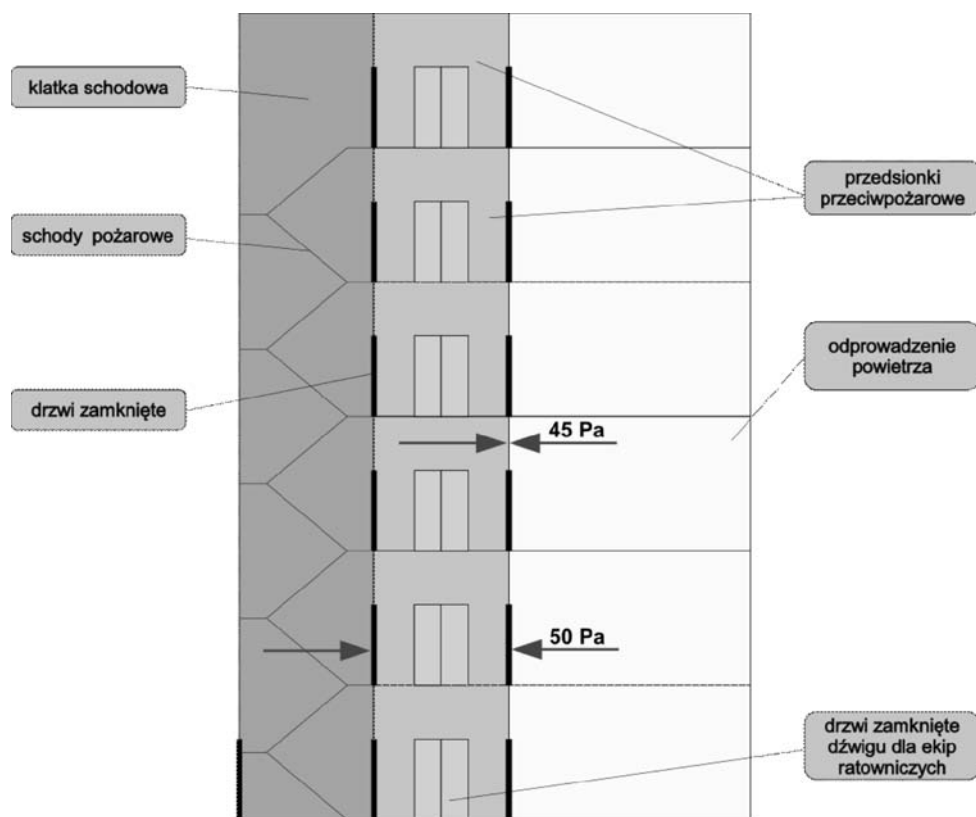
- różnica ciśnień między przedsionkiem przeciwpożarowym, a powierzchnią użytkową – 45 Pa,
- prędkość przepływu powietrza przy otwartych drzwiach z przedsionka, a powierzchnią użytkową – 2 m/s,
- podczas pracy systemu siła otwarcia drzwi nie powinna przekraczać 100 N,
- system powinien uruchomić się w czasie do 60 s od momentu wykrycia pożaru,
- wentylatory powinny zapewnić ponad 90% wymaganego strumienia powietrza podczas otwarcia drzwi w czasie do 3 s,
- system powinien posiadać dodatkowe źródło zasilania elektrycznego w postaci generatora lub oddzielnej podstacji transformatorowej.

W sposób graficzny minimalne wymagania systemu kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła wykonanego w klasie B zaprezentowano na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Kryterium przepływu powietrza dla systemów klasy B





Rys. 3. Kryterium różnicy ciśnień dla systemów klasy B

## 2. Warunki krytyczne dla prowadzenia ewakuacji

Podczas analizy bezpieczeństwa ewakuacji, należy określić dostępny czas bezpiecznej ewakuacji (DCBE). Jest to czas, w którym parametry, takie jak temperatura, zasięg widzialności oraz stężenia gazów pożarowych nie przekraczają określonych krytycznych wartości [7]. Temperatura na wysokości 1,8 m nie może przekraczać  $60^{\circ}\text{C}$ , natomiast temperatura górnej warstwy produktów spalania nie powinna przekraczać  $180^{\circ}\text{C}$  [8]. Zadymienie nie może ograniczać zasięgu widzialności na wysokości 1,8 m poniżej 10 m [7]. Analizując stężenia toksycznych gazów pożarowych, należy zwrócić uwagę na bezpieczne stężenie tlenu węgla. Rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy [9] określa stężenie NDSch (najwyższe dopuszczalne stężenie chwilowe) tlenu węgla o wartości  $117\text{ mg/m}^3$  (ok. 100 ppm) oraz stężenie NDS (najwyższe dopuszczalne stężenie) o wartości  $23\text{ mg/m}^3$  (ok. 20 ppm). Obecnie w Polsce stężenia tlenu węgla uwzględnia się przy projektowaniu garaży [10], które muszą być wyposażone w odpowiednią



wentylację. Detektory CO powinny być w takich obiektach instalowane na wysokości 1,8 – 2 m od posadzki. Zadziałanie detektora powinno powodować włączenie wentylacji i alarmu po przekroczeniu najwyższego dopuszczalnego stężenia [11]. Z kolei norma *Published Document 7974-6, „The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings. Human factors. Life safety strategies. Occupant evacuation, behavior and condition (Sub-system 6)”* [12] dopuszcza wartość  $1374 \text{ mg/m}^3$  (ok. 1200 ppm) przy pięciominutowej ekspozycji w trakcie prowadzenia ewakuacji.

### 3. Symulacje wybranych scenariuszy pożarowych i ewakuacji

#### 3.1. Dobór oprogramowania do analizy

Do przeprowadzenia analizy wykorzystano program FDS – *Fire Dynamics Simulator*. Jest to oprogramowanie stale rozwijane przez *National Institute of Standards and Technology* (NIST). Program FDS jest cennym narzędziem, które z powodzeniem wykorzystywane jest w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. Symulacje ewakuacji przeprowadzono przy zastosowaniu rozszerzenia Evac. Rozszerzenie rozwijane jest przez fińską *VVT Technical Research Centre of Finland*.

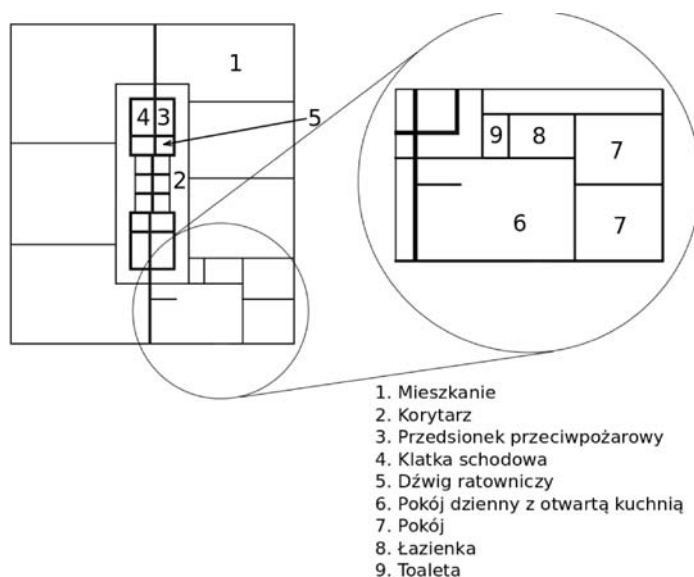
#### 3.2. Charakterystyka budynku wysokościowego

W budynku występują dwie klatki schodowe z przedsionkami przeciwpożarowymi (rysunek 4). W przedsionkach przeciwpożarowych znajdują się wejścia do dźwigu dla ekip ratowniczych. Obydwie klatki schodowe wydzielono pożarowo z całości budynku. Każda kondygnacja przeznaczona na mieszkania podzielona jest na dwie strefy pożarowe. W każdej ze stref może występować różna liczba mieszkań w zależności od aranżacji. Klatki schodowe, przedsionki przeciwpożarowe, szyby wind dla ekip ratowniczych zabezpieczone systemem kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła wykonano w klasie B. Poziome drogi ewakuacyjne w postaci korytarzy zabezpieczono wentylacją pożarową wykonaną zgodnie z instrukcją ITB nr 378/2002. Mieszkania wyposażone są w system sygnalizacji pożaru, punktowe czujki dymu o czułości 10%/m. Ciągi komunikacyjne, oprócz systemu sygnalizacji pożaru, wyposażone są w dźwiękowy system ostrzegawczy.

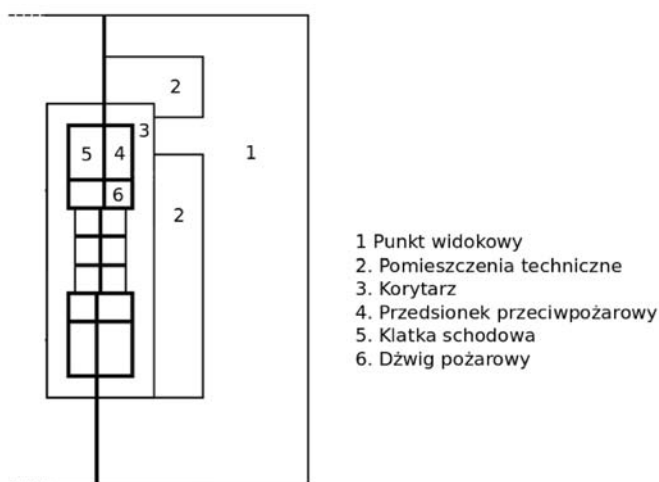
Punkt widokowy zlokalizowano na najwyższej kondygnacji. Stanowi on przestrzeń zamkniętą, oszkloną od strony ścian zewnętrznych budynku. Punkt widokowy znajduje się w obrębie jednej strefy pożarowej. Oprócz punktu widokowego z przestrzeni strefy pożarowej wydzielono pomieszczenia techniczne na instalacje związane z funkcjonowaniem budynku. Z punktu widokowego prowadzi jedna droga ewakuacyjna do przedsionka przeciwpożarowego, a następnie klatką schodową na zewnątrz budynku. W zależności od decyzji kierującego działaniem ratowniczym, możliwe jest prowadzenie ewakuacji przy wykorzystaniu dźwigu pożarowego. W celu zmniejszenia możliwości powstania i rozwoju



pożaru w pomieszczeniach technicznych zastosowano stałe urządzenia gaśnicze tryskaczowe. Zainstalowane tryskacze mają podstawową temperaturę zadziałania równą 68°C oraz wskaźnik RTI (*Response Time Index*) równy 100, charakteryzujący tryskacze standardowego reagowania. Ponadto w korytarzu zainstalowano wentylację pożarową zgodnie z wytycznymi ITB 378/2002. Pionowe drogi ewakuacyjne, przedsionek przeciwpożarowy oraz dźwig pożarowy zabezpieczony systemem kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła wykonanym w klasie B zgodnie z Polską Normą [5].



Rys. 4. Rzut poziomy kondygnacji ZLIV



Rys. 5. Rzut poziomy kondygnacji z punktem widokowym



### 3.3. Ewakuacja i rozwój pożaru dla kondygnacji ZLIV

W mieszkaniach brak jest dźwiękowego systemu ostrzegawczego, z tego względu nie ma możliwości przyjęcia czasu alarmowania. Lokatorzy mieszkań mogą nie usłyszeć komunikatu ogłoszonego na korytarzu, dlatego nie można jednoznacznie wyznaczyć wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji. Niemniej jednak rozszerzenie Evac pozwala na oszacowanie czasu przejścia z poszczególnych mieszkań do wydzielonego przedsionka przeciwpożarowego. Czas przejścia z mieszkania do drzwi przedsionka przeciwpożarowego ostatnich ewakuowanych osób wynosi 41 s.

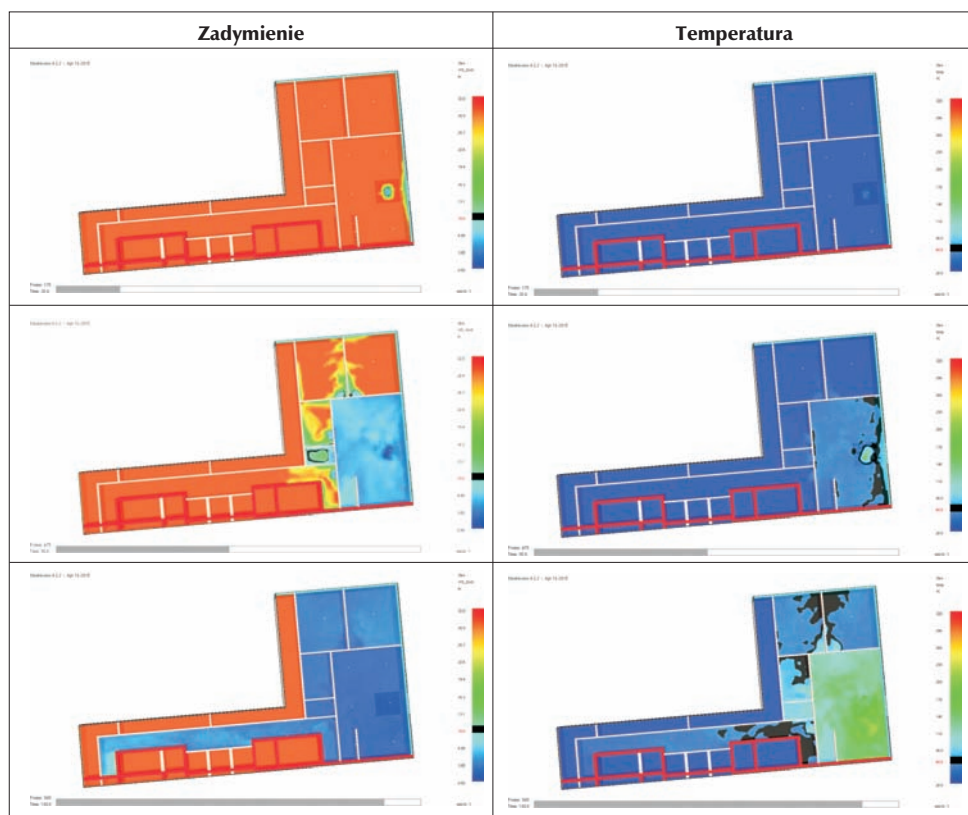
W celu zobrazowania zjawisk towarzyszących pożarowi i procesom oddymiania symulacje wykonano przy otwartych drzwiach do mieszkania, w którym rozwija się pożar. Mieszkanie podzielone zostało na pięć pomieszczeń (salon z otwartą kuchnią, łazienka, toaleta, dwie sypialnie). Rzut mieszkania przedstawiono na rysunku 4. Ponadto, aby przedstawić skuteczność zastosowanego systemu kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła i wentylacji pożarowej, wykonano dwie symulacje. Pierwsza z rozwijającym się pożarem bez uruchomionych ww. systemów, druga z uruchomionymi elementami systemu.

Przy modelowaniu założono szybki rozwój pożaru, zgodnie z krzywą dla współczynnika  $\alpha = 0,04689$  [13]. Pożar został zlokalizowany w salonie. Przyjęto, że ognisko pożaru obejmuje mebel wykonany z drewna. Pożarem objęta jest zewnętrzna część mebla o powierzchni  $8 \text{ m}^2$ . Rozkład maksymalnej mocy wydzielanej podczas pożaru mebla to  $230 \text{ kW/m}^2$ . System sygnalizacji pożaru wyposażony w punktowe czujki dymu o czułości równej  $10\%/m$ . System sygnalizacji pożaru wykrywa pożar (alarm z jednej czujki) po 21 s od jego zainicjowania. System wchodzi w stan alarmu pożarowego w 35 s, gdy uruchomiona zostaje druga czujka dymu. Czasy zadziałania systemu sygnalizacji pożaru zostały obliczone w programie FDS, który pozwala na wprowadzenie do modelu urządzeń przeciwpożarowych o określonych parametrach. Zadymienie powodujące ograniczenie widzialności poniżej 10 m zaczyna występować w mieszkaniu od 95 s. Zadymienie może powodować zagrożenie dla ewakuujących się osób. Ewakuacja nadal jest możliwa natomiast nie jest to ewakuacja w warunkach bezpiecznych. Od około 135 s po powstaniu pożaru gorące gazy zaczynają sukcesywnie wypełniać korytarz. Całkowite wypełnienie korytarza gazami pożarowymi uniemożliwiające prowadzenie bezpiecznej ewakuacji następuje po 180 s od powstania pożaru.

Do symulacji z działającą wentylacją pożarową przyjęto takie same parametry pożaru. Dla wentylacji natomiast wprowadzono następujące założenia:

- przepływ powietrza z przedsionka do korytarza ewakuacyjnego  $4,8 \text{ m}^3/\text{s}$ , przy założeniu prędkości przepływu  $2 \text{ m/s}$  dla systemu klasy B [5] przez drzwi o szerokości  $120 \text{ cm}$ ,
- wydajność wentylacji wyciągowej stanowiącej wydajność równą  $130\%$  ilości powietrza dostarczanego –  $6,24 \text{ m}^3/\text{s}$  [6].





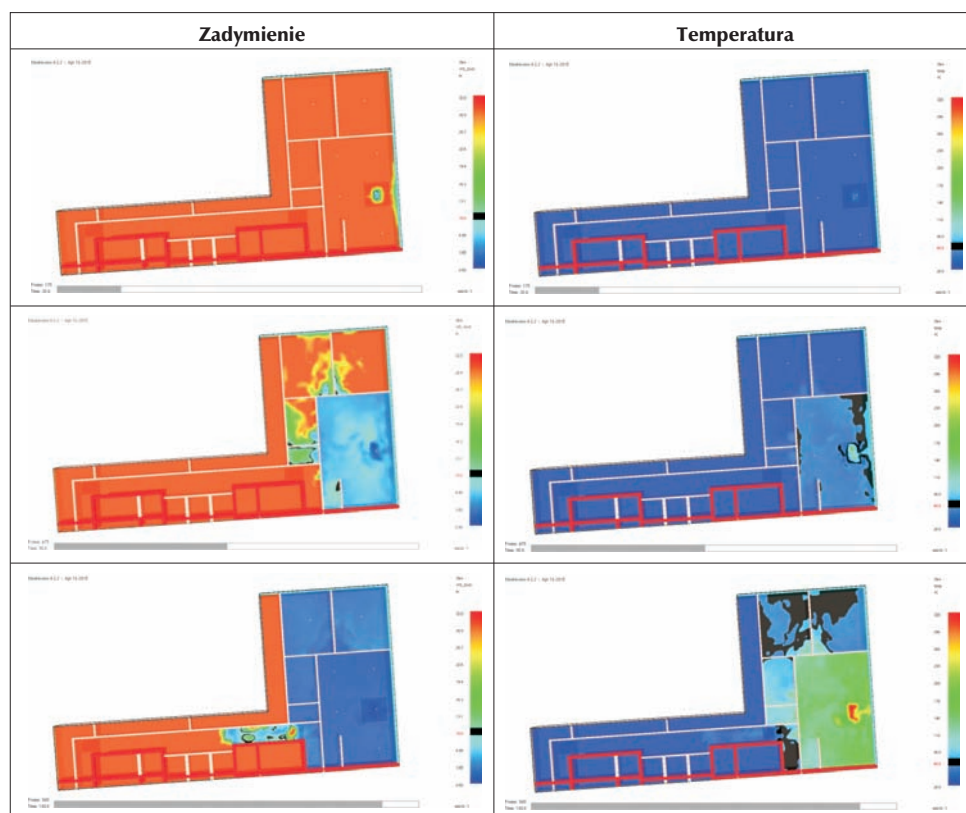
Rys. 6. Rozkład zadymienia i temperatury przy wyłączonej wentylacji pożarowej (35 s, 135 s, 180 s)

Występujące przy oknach, drzwiach, łączeniach ścian, stropów nieszczelności oszacowano na podstawie [5]. W przypadku rozpatrywanej strefy pożarowej na kondygnacji ZLIV łącznie powierzchnia nieszczelności wynosi  $2793 \text{ cm}^2$ . W symulacji, ze względu na rozdzielczość obliczeniową równą  $400 \text{ cm}^2$ , dla każdej komórki przyjęto wartość równą  $2800 \text{ cm}^2$ .

W analizowanym przykładzie system sygnalizacji pożaru wchodzi w stan alarmu pożarowego w 35 s od powstania pożaru. Wtedy również uruchomiony zostaje system kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła oraz wentylacja pożarowa. W początkowej fazie pożar rozprzestrzenia się tak samo jak przy braku systemów przeciwpożarowych. Od około 85 s, gdy zadymienie wypełnia całą przestrzeń podsufitową pomieszczenia objętego pożarem, daje się zauważyć skuteczność wentylacji pożarowej. Dym sukcesywnie odprowadzany jest przez wentylację zlokalizowaną w korytarzu. Przy braku wentylacji pożarowej od 135 s dym sukcesywnie wypełniał korytarz. Natomiast przy działającej wentylacji w znacznej części jest odprowadzany. W przypadku funkcjonowania wentylacji zadymienie utrzymuje się jedynie w obrębie kratki wentylacyjnej. Dopiero po około 180 s zadymienie zaczyna przedostawać się poza kratkę wentylacyjną i stopniowo wypełnia



pozostałą część korytarza. Ewakuacja w takiej sytuacji z sąsiednich mieszkań jest jeszcze możliwa, ale nie jest to ewakuacja w warunkach bezpiecznych. Do końca zakładanego czasu symulacji, tj. 200 s zadymienie, w przypadku działającej wentylacji, wypełnia blisko połowę długości korytarza. Analogicznie w sytuacji braku wentylacji na całej długości korytarza występowały warunki uniemożliwiające bezpieczną ewakuację. Korzyści płynące z zastosowania wentylacji pożarowej są ogromne. Wydłużenie dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji może przyczynić się do uratowania wielu osób.



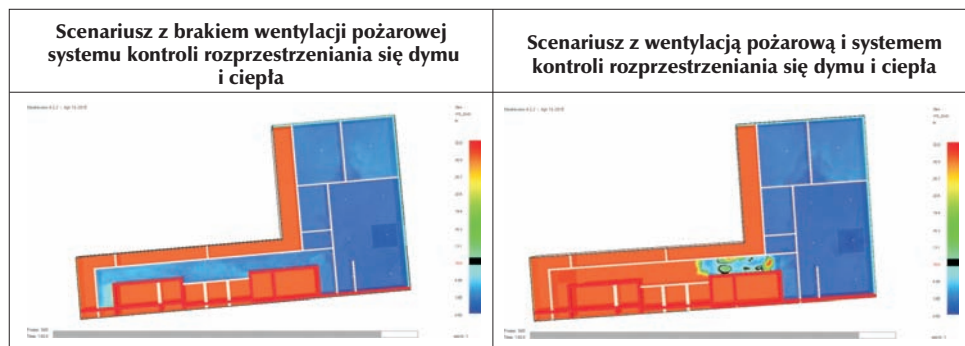
Rys. 7. Rozkład zadymienia i temperatury kondygnacji przy włączonej wentylacji

Pożar w konsekwencji zostanie ograniczony poprzez wentylację, ale nastąpi sukcesywne wypełnienie całego korytarza dymem. System kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła uniemożliwi zadymienie dźwigów pożarowych oraz klatki schodowej.

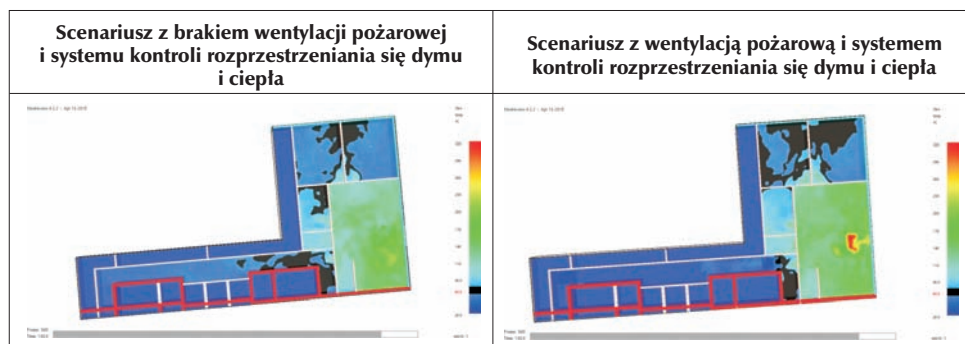
Analizowane przypadki prezentują możliwość zastosowania oprogramowania CFD do modelowania rozprzestrzeniania się pożaru oraz do oszacowania dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji. Z przeprowadzonej analizy wynika, że zastosowanie systemu kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła oraz wentylacji



pożarowej powoduje intensywne odprowadzanie dymu, a w konsekwencji wydłużenie dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji z 135 s do 180 s. Ponadto modelowanie obejmuje najbardziej niekorzystny scenariusz, tj. brak ograniczenia rozprzestrzeniania się dymu poprzez drzwi do mieszkania objętego pożarem. W przypadku rzeczywistego pożaru można spodziewać się, że drzwi takie przynajmniej przez jakiś czas będą pozostawały zamknięte, co spowoduje wydłużenie dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji z sąsiednich mieszkań. Dla porównania na rysunkach 8 i 9 zestawiono rozkład zadymienia oraz temperatury w 180 s od powstania pożaru dla obydwu scenariuszy.



Rys. 8. Rozkład zadymienia kondygnacji ZLIV w 180 s



Rys. 9. Rozkład temperatury kondygnacji ZLIV w 180 s

### 3.4. Ewakuacja i rozwój pożaru dla kondygnacji z punktem widokowym

W wielu budynkach wysokościowych tworzy się punkty widokowe, które zapewniają możliwość podziwiania widoków z dużej wysokości. Na ostatniej kondygnacji rozpatrywanego budynku wysokościowego wydzielono fragment powierzchni przeznaczony na punkt widokowy zakwalifikowany do kategorii ZLIII. Przestrzeń techniczna została oddzielona ścianami od powierzchni punktu widokowego. Przedsionek przeciwpożarowy, dźwig pożarowy oraz klatkę

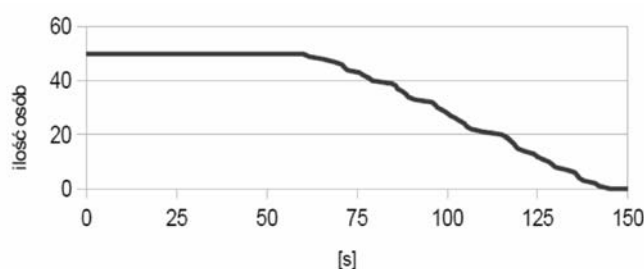


schodową prowadzącą z tej kondygnacji zabezpieczono systemem kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła w klasie B. Ponadto kondygnację zabezpieczono w system sygnalizacji pożaru oraz stałe urządzenia gaśnicze tryskaczowe. Rzut poziomy kondygnacji przedstawiono na rysunku 5.

Punkt widokowy został objęty działaniem dźwiękowego systemu ostrzegawczego. Po otrzymaniu alarmu pożarowego drugiego stopnia wygłaszany jest komunikat wzywający do ewakuacji. Ze względu na jedno wyjście ewakuacyjne do symulacji przyjęto maksymalną możliwą liczbę osób.

Dla symulacji ewakuacji przyjęto następujące warunki początkowe:

- liczba osób ewakuowanych – 50,
- czas reakcji pierwszych osób po alarmie pożarowym 30 s [12],
- czas reakcji ostatnich osób 120 s [12],
- osoby wchodzące do przedsionka przeciwpożarowego uznawane są jako ewakuowane z zagrożonej kondygnacji gdyż opuszczają strefę pożarową.

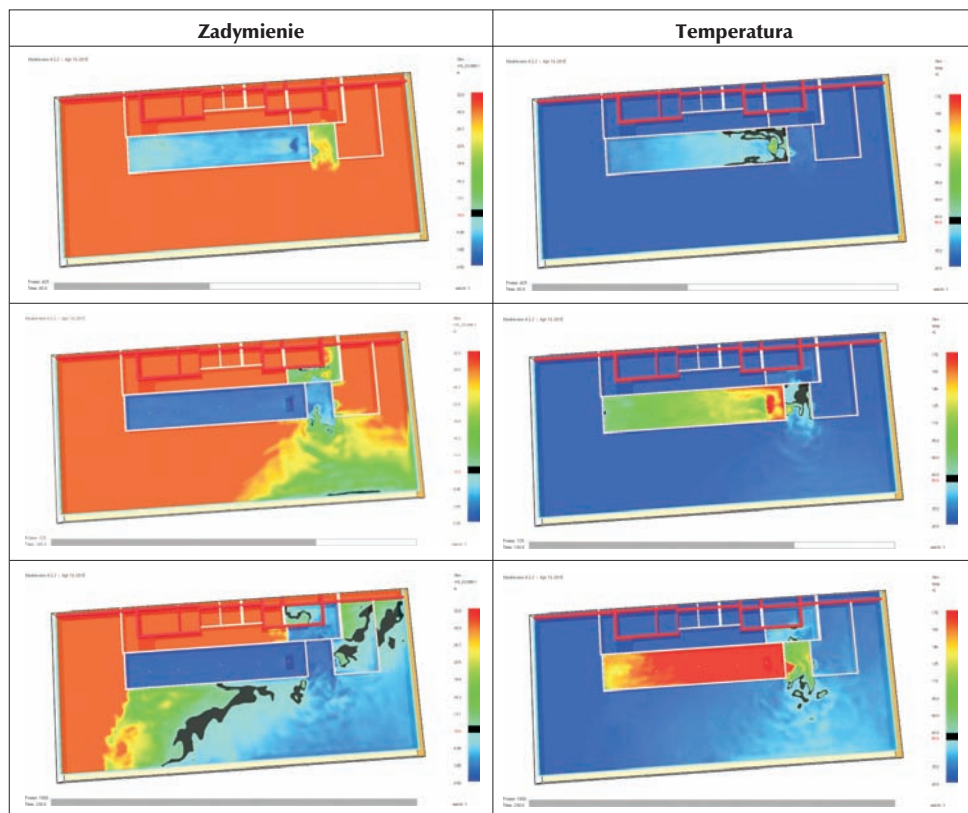


Rys. 10. Liczba osób w strefie ZLIII

Modelowanie ewakuacji wykonano przy zastosowaniu rozszerzania Evac do programu FDS. W wyniku przeprowadzonej symulacji określono, że czas ewakuacji od chwili wygłoszenia komunikatu z dźwiękowego systemu ostrzegawczego nie przekracza 145 s. Ze względu na niewielką liczbę osób w porównaniu z szerokością poziomych dróg ewakuacyjnych, nie zaobserwowano zjawiska powstawania skupisk ludzi w obrębie wyjść ewakuacyjnych.

Do analizy rozwoju pożaru przyjęto scenariusz, w którym palący się przedmiot wykonany z drewna o powierzchni zewnętrznej  $8 \text{ m}^2$  znajdujący się w przestrzeni technicznej, będzie powodował zadymienie korytarza prowadzącego z punktu widokowego do przedsionka przeciwpożarowego. W symulacji przyjęto szybki rozwój pożaru, zgodnie z krzywą rozwoju dla współczynnika  $\alpha = 0,04689$ . Wykonano dwie symulacje dla dokładniejszej prezentacji skuteczności zainstalowanych systemów przeciwpożarowych. Pierwsza, przy braku stałych urządzeń gaśniczych tryskaczowych i systemu kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła, natomiast druga przy działających systemach.





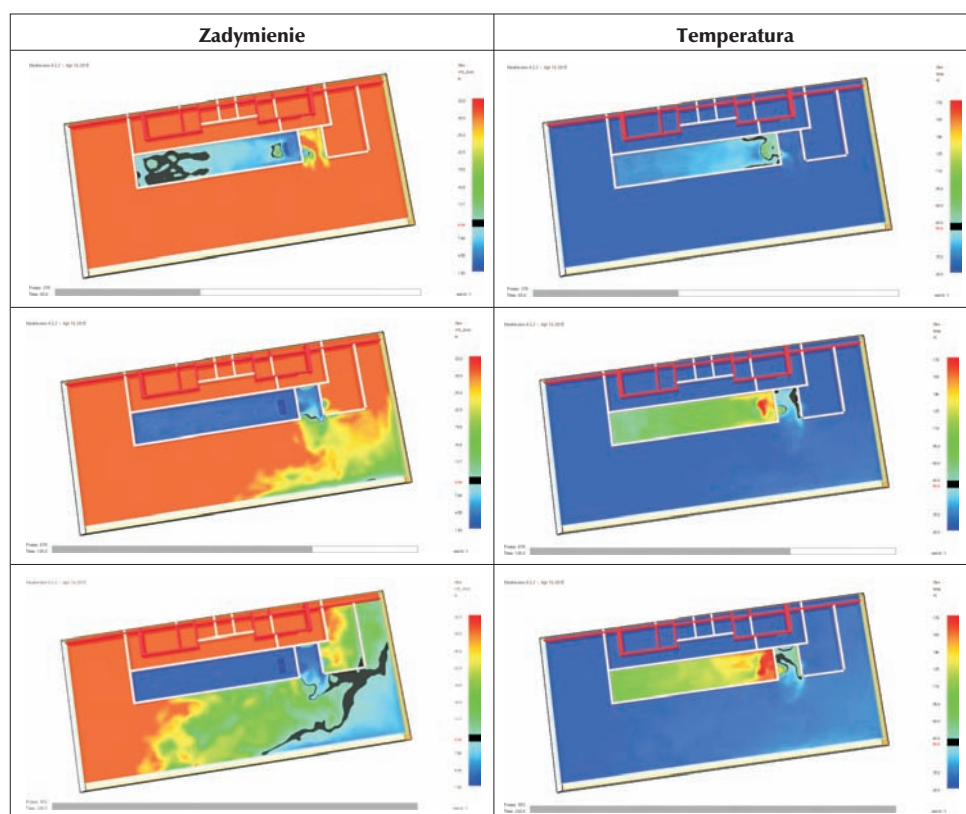
**Rys. 11.** Rozkład zadymienia i temperatury kondygnacji ZLIII przy wyłączonym systemie kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła oraz braku stałych urządzeń gaśniczych tryskaczowych (85 s, 145 s, 200 s)

W analizowanym scenariuszu system sygnalizacji pożaru wchodzi w stan alarmu drugiego stopnia po 35 s od powstania pożaru. Całkowite wypełnienie części podsufitowej pomieszczenia technicznego gazami pożarowymi następuje po 85 s. Następuje intensywne rozprzestrzenianie się gorących gazów pożarowych w kierunku przestrzeni punktu widokowego oraz na korytarz stanowiący drogę ewakuacyjną. Dostępny czas bezpiecznej ewakuacji kończy się w 170 s, gdy zadymieniu ulega korytarz prowadzący bezpośrednio do przedsionka przeciwpożarowego. Po 200 s od powstania pożaru zadymieniu ulega ponad połowa powierzchni punktu widokowego. Ponadto zadymienie swobodnie może przedostawać się, poprzez otwarte drzwi, do przedsionka przeciwpożarowego. Gorące gazy pożarowe o temperaturze przekraczającej  $60^{\circ}\text{C}$  intensywnie napływają do pomieszczenia punktu widokowego.

Drugim analizowanym scenariuszem jest sytuacja, w której zastosowano stałe urządzenia gaśnicze tryskaczowe oraz system kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła. Podczas symulacji system sygnalizacji pożaru wchodzi w stan alar-



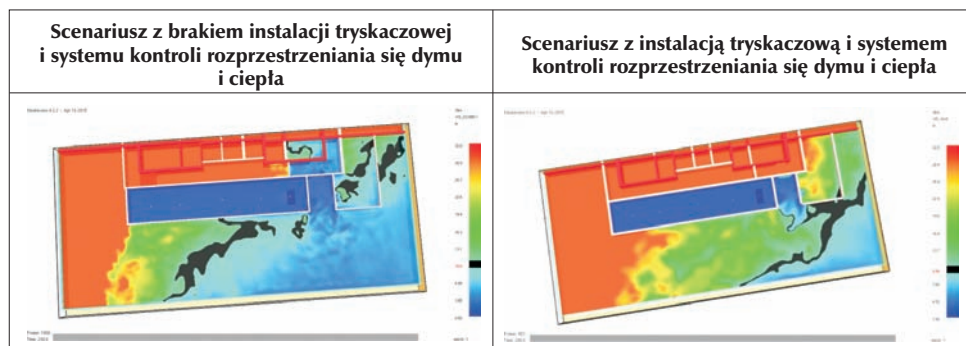
mu pożarowego drugiego stopnia w 35 s od powstania pożaru. Pierwszy tryskacz zostaje uruchomiony w 134 s. Do wyznaczenia czasu zadziałania instalacji tryskaczowej wykorzystano możliwości programu FDS, który pozwala na wprowadzenie do modelu urządzeń przeciwpożarowych. Od tego czasu w symulacji przyjęto stałą moc pożaru. Zadymienie oraz temperatura gazów pożarowych rośnie, ale znacznie wolniej niż w poprzednim scenariuszu. Korytarz prowadzący bezpośrednio do przedsionka przeciwpożarowego pozostaje niezadymiony nawet 200 s po powstaniu pożaru. Zapewnia to stały dopływ powietrza do korytarza z przedsionka przeciwpożarowego i usuwanie produktów spalania poprzez wentylację pożarową. Ponadto działająca instalacja tryskaczowa powoduje ograniczenie temperatury gazów pożarowych w pomieszczeniu technicznym. Temperatura gazów pożarowych w przejściu z punktu widokowego do korytarza ewakuacyjnego około 200 s od powstania pożaru kształtuje się w granicach 60°C.



**Rys. 12.** Rozkład zadymienia i temperatury kondygnacji ZLIII przy włączonym systemie kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła oraz zadziałaniu stałych urządzeń gaśniczych tryskaczowych (85 s, 145 s, 200 s)

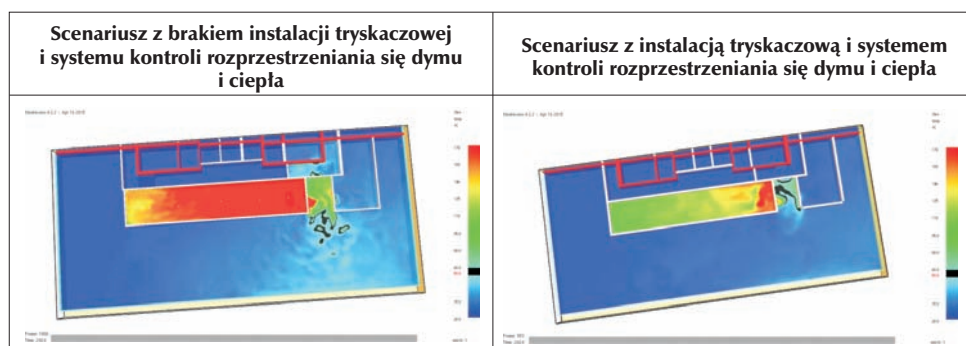


W analizowanych scenariuszach dostępny czas bezpiecznej ewakuacji wynosi odpowiednio 170 s i 200 s. Stałe urządzenia gaśnicze tryskaczowe oraz system kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła powodują wydłużenie dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji.



Rys. 13. Rozkład zadymienia kondygnacji ZLIII w 200 s

W przypadku braku instalacji tryskaczowej i systemu kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła, gorące produkty spalania wypełniają korytarz ewakuacyjny, mogą również przedostać się do przedsionka przeciwpożarowego. Ponadto w przypadku braku ww. instalacji w czasie 200 s od powstania pożaru następuje zadymienie ograniczające widzialność poniżej 10 m w ponad połowie przestrzeni punktu widokowego. Zainstalowana instalacja tryskaczowa ogranicza rozwój pożaru. Temperatura gazów pożarowych jest znacznie niższa niż w przypadku braku instalacji tryskaczowej. Dodatkowo system kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła uniemożliwia przedostanie się gazów pożarowych do korytarza ewakuacyjnego prowadzącego bezpośrednio do przedsionka przeciwpożarowego.



Rys. 14. Rozkład temperatury kondygnacji ZLIII w 200 s

Zastosowanie systemu kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła oraz instalacji tryskaczowej powoduje wydłużenie dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji o 30 s.



Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji, uwzględniając czas zadziałania systemu sygnalizacji pożaru, wynosi 180 s. Jest to suma czasu wykrycia pożaru – 35 s i opuszczenia punktu widokowego przez ludzi – 145 s. Porównując go z dostępnym czasem bezpiecznej ewakuacji, wynika, że w pierwszym przypadku ewakuacja ostatnich osób odbywałaby się w warunkach niebezpiecznych (ograniczenie widzialności oraz temperatura gazów pożarowych). Natomiast w przypadku drugiego scenariusza margines bezpieczeństwa wynosi 20 s. Czas ten daje możliwość ewakuacji wszystkich osób w warunkach bezpiecznych.

## Podsumowanie

Postęp w dziedzinie inżynierii bezpieczeństwa pożarowego odbywa się na wielu płaszczyznach. Jedną z nich są systemy przeciwpożarowe pozwalające na ograniczenie rozwoju i rozprzestrzeniania się pożarów w budynkach. Ponadto ogromny postęp odbywa się w dziedzinie modelowania zjawisk fizycznych. Szerokie zastosowanie w modelowaniu pożarów i działania instalacji przeciwpożarowych ma program FDS. Jest to narzędzie pozwalające na wprowadzenie do modelu instalacji przeciwpożarowych, tj.: system sygnalizacji pożarowej, stałe instalacje gaśnicze, wentylację pożarową, systemy kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła. Zapewnia to możliwość weryfikacji skuteczności zastosowanych instalacji i systemów. Dodatkowo rozszerzenie Evac umożliwia oszacowanie czasu ewakuacji z modelowanych pomieszczeń lub budynków. Określenie wymaganego i dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji może dać odpowiedź na pytanie, czy istniejące zabezpieczenia są wystarczające, czy też inwestor musi wprowadzić dodatkowe zabezpieczenia.

Zastosowanie systemu kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła w budynkach wysokościowych pozwala na utrzymanie dróg ewakuacyjnych w stanie umożliwiającym ewakuację przez wydłużenie dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji. Ułatwia również prowadzenie działań ratowniczo-gaśniczych przez przybyłych na miejsce strażaków, ograniczając rozprzestrzenianie się dymu i gorących gazów. Dodatkowo zastosowanie stałych urządzeń gaśniczych prowadzi do obniżenia temperatury gazów pożarowych oraz ograniczenie mocy pożaru.

## Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (DzU z 2002 r. nr 75, poz. 690 z późn. zm.).
- [2] Urbanity, [on line] [dostęp: 15.11.2015] <http://www.urbanity.pl>.
- [3] Fire breaks out at Dubai's Torch skyscraper, hundreds evacuated, [on line] [dostęp: 15.11.2015] <http://www.newskarnataka.com/nri/fire-breaks-out-at-dubais-torch-skyscraper-hundreds-evacuated>.



- [4] Barański M., Maciak T.: Przegląd aktów prawnych i norm związanych z zagadnieniem ewakuacji, *Zeszyty Naukowe SGSP* 2013, nr 47(3), str. 100-112.
- [5] PN-EN 12101-6:2007 Systemy kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła. Część 6: Wymagania techniczne dotyczące systemów różnicowania ciśnień – Zestawy urządzeń.
- [6] Kosiorek M., Głąbski P.: Instrukcja nr 378/2002 ITB. Projektowanie instalacji wentylacji pożarowej dróg ewakuacyjnych w budynkach wysokich i wysokościowych, ITB, Warszawa 2002.
- [7] Barański M., Maciak T.: Określanie czasu procesu bezpiecznej ewakuacji ludności z zagrożonych obiektów, *Zeszyty Naukowe SGSP* 2014, nr 49(1), str. 78-97.
- [8] Konecki M.: Wpływ szybkości wydzielania ciepła i emisji dymu na rozwój pożaru w układzie pomieszczeń, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa 2007.
- [9] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (DzU z 2002 r. nr 217, poz. 1833 z późn. zm.)
- [10] Makhniashvili I., Makles Z.: Zagrożenia w podziemnych parkingach samochodowych – toksyczne, pożarowe i wybuchowe, *Bezpieczeństwo Pracy* 2007, nr 11, str. 10-13.
- [11] Joniec W.: Wentylacja garaży – sterowanie detektorami CO i LPG, *Rynek Instalacyjny* 2009, nr 6, str. 67-70.
- [12] Publish Document 7974-6:2004 The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings – Human factors: Life safety strategies – Occupant evacuation, behavior and condition (Sub-system 6), British Standards Institute 2004.
- [13] Procedury organizacyjno-techniczne w sprawie spełnienia wymagań w zakresie bezpieczeństwa pożarowego w inny sposób niż to określono w przepisach techniczno-budowlanych, w przypadkach wskazanych w tych przepisach, oraz stosowania rozwiązań zamiennych, zapewniających nie pogorszenie warunków ochrony przeciwpożarowej, w przypadkach wskazanych w przepisach przeciwpożarowych, Biuro Rozpoznawania Zagrożeń Komendy Głównej Państwowej Straży Pożarnej, Warszawa 2008 [on line] [dostęp: 15.11.2015], <http://www.straz.gov.pl/download/1795>.