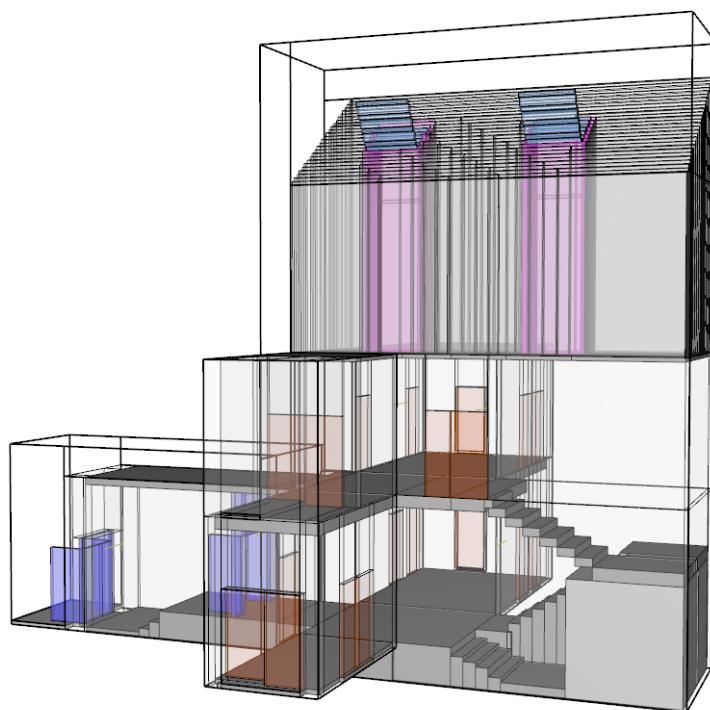


**RAPORT Z SYMULACJI KOMPUTEROWEJ CFD DLA POTRZEB  
OCENY SKUTECZNOŚCI ZADZIAŁANIA INSTALACJI  
ODDYMIANIA GRAWITACYJNEGO KLATKI SCHODOWEJ**

Obiekt:	KŁATKA SCHODOWA W BUDYNKU SZKOLNYM LIPINY 14 92-701 LIPINY
Zleceniodawca:	POWERSUN SP. Z O.O. ŁAZIENKOWSKA 16 20-416 LUBLIN
Nr dokumentu:	23-129_LIPINY_KL_SCH_R_1.0



Data:	Wersja:	Uwagi:
31.08.2023	1.0	Przekazana Zleceniodawcy

Opracowanie:	mgr inż. Agnieszka Góral-Zawadzka <a href="mailto:agnieszka@inbepo.pl">agnieszka@inbepo.pl</a>	
Weryfikacja:	mgr inż. Janusz Paliszek-Saładyga <a href="mailto:janusz@inbepo.pl">janusz@inbepo.pl</a>	

# SPIS TREŚCI

<b>1.0</b>	<b>PRZEDMIOT, ZAKRES I CEL OPRACOWANIA.....</b>	<b>1</b>
<b>2.0</b>	<b>OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU .....</b>	<b>1</b>
2.1	DANE OGÓLNE BUDYNKU .....	1
2.2	INFORMACJE DOTYCZĄCE SPOSOBU UŻYTKOWANIA ROZPATRYWANYCH KONDYGNACJI .....	1
2.3	KOMUNIKACJA OGÓLNA I STRATEGIA EWAKUACJI W OBRĘBIE ANALIZOWANEGO OBSZARU .....	1
2.4	UWARUNKOWANIA DZIAŁAŃ RATOWNICZO-GAŚNICZYCH JEDNOSTEK PSP .....	1
2.5	RZUTY I PRZEKROJE KLATEK SCHODOWYCH WRAZ Z ELEMENTAMI SYSTEMU ODDYMIANIA .....	2
<b>3.0</b>	<b>WSTĘPNE OBLICZENIA ANALITYCZNE WG WYTYCZNYCH CNBOP-PIB W-0003:2019 .....</b>	<b>4</b>
3.1	PRZYJĘTA METODYKA OBLICZEŃ I WERYFIKACJI.....	4
3.2	OBLICZENIA ANALITYCZNE .....	4
<b>4.0</b>	<b>OPIS PROGRAMU FDS .....</b>	<b>5</b>
4.1	NAZWA I WERSJA PROGRAMU.....	5
4.2	PODSTAWOWE CECHY PROGRAMU FDS .....	5
4.3	KLUCZOWE MODELE MATEMATYCZNO - FIZYCZNE PROGRAMU FDS .....	6
4.4	SPOSÓB DEFINICJI MODELU .....	6
4.5	WERYFIKACJA PROGRAMU FDS.....	7
<b>5.0</b>	<b>OPIS ZAŁOŻEŃ PRZYJĘTYCH W ANALIZIE NUMERYCZNEJ .....</b>	<b>7</b>
5.1	PRZYJĘTA METODYKA ANALIZY .....	7
5.2	ZAŁOŻENIA WYNIKAJĄCE Z DOSTĘPNYCH DANYCH DOTYCZĄCYCH OBIEKTU.....	7
5.3	OBCIĄŻENIE OGNIOWE .....	7
5.4	AKTYWNE SYSTEMY OCHRONY PRZECIWPOŻAROWEJ .....	7
5.5	ZAŁOŻENIA DOTYCZĄCE WARUNKÓW POCZĄTKOWYCH WEWNĄTRZ I NA ZEWNĄTRZ OBIEKTU .....	8
5.6	POŻAR TESTOWY .....	8
5.7	CZAS TRWANIA SYMULACJI I PRZEBIEG ANALIZY .....	10
5.8	SIATKA OBLICZENIOWA .....	10
5.9	MODEL OBLICZENIOWY I GEOMETRIA PRZESTRZENI .....	10
5.10	KRYTERIA SKUTECZNOŚCI DZIAŁANIA SYSTEMU ODDYMIANIA KLATKI SCHODOWEJ.....	12
<b>6.0</b>	<b>WYNIKI SYMULACJI CFD .....</b>	<b>13</b>
6.1	ANALIZA DLA WARUNKÓW IZOTERMICZNYCH.....	13
6.2	WYNIKI DLA WARUNKÓW LETNICH.....	14
6.3	WYNIKI DLA WARUNKÓW ZIMOWYCH.....	16
6.4	WYKRESY TRANSMITANCJI ŚWIATŁA DLA POSZCZEGÓLNYCH WARUNKÓW TEMPERATUROWYCH .....	17
<b>7.0</b>	<b>WNIOSKI.....</b>	<b>19</b>
	<i>Załącznik A – Literatura .....</i>	<i>20</i>

## 1.0 PRZEDMIOT, ZAKRES I CEL OPRACOWANIA

Niniejsze opracowanie obejmuje swym zakresem przestrzeń klatki schodowej budynku przedszkolno-szkolnego przy ul. Lipiny 14 w Lipinach.

Celem niniejszej analizy jest sprawdzenie skuteczności funkcjonowania proponowanego systemu usuwania dymu z klatki schodowej w kontekście wymogów stawianych przez Wytyczne CNBOP-PIB W-0003:2019 oraz zaleceń i wytycznych w/w dokumentu. Niniejsze sprawdzenie wykonano za pomocą analizy numerycznej CFD, bazując na wstępnym oszacowaniu parametrów systemu w oparciu o Wytyczne CNBOP-PIB W-0003:2019 (wydanie 2).

Przedmiotową analizę wykonano na podstawie danych otrzymanych od Zleceniodawcy w sierpniu 2023.

W celu prognozy rozprzestrzenienia się dymu i ciepła oraz temperatur gazów pożarowych w przestrzeni klatek schodowych, w obrębie których zlokalizowano pożar testowy, przeprowadzono szczegółową analizę z wykorzystaniem zaawansowanego modelu pożaru odwzorowanego komputerowo za pomocą numerycznej mechaniki płynów (ang. *Computational Fluid Dynamics*). Symulacje komputerowe oparte na metodzie CFD są zaawansowanym narzędziem stosowanym w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. Pozwalają one na szczegółową analizę rozprzestrzeniania się ciepła i dymu w budynkach, w których wystąpił pożar.

## 2.0 OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU

### 2.1 Dane ogólne budynku

Wysokość budynku liczona od poziomu terenu do kalenicy dachu nie przekracza 25 metrów - budynek sklasyfikowano jako **średniowysoki (SW)**.

### 2.2 Informacje dotyczące sposobu użytkowania rozpatrywanych kondygnacji

Na poszczególnych kondygnacjach nadziemnych znajdują się klasy szkolne (łącznie z parterem)

### 2.3 Komunikacja ogólna i strategia ewakuacji w obrębie analizowanego obszaru

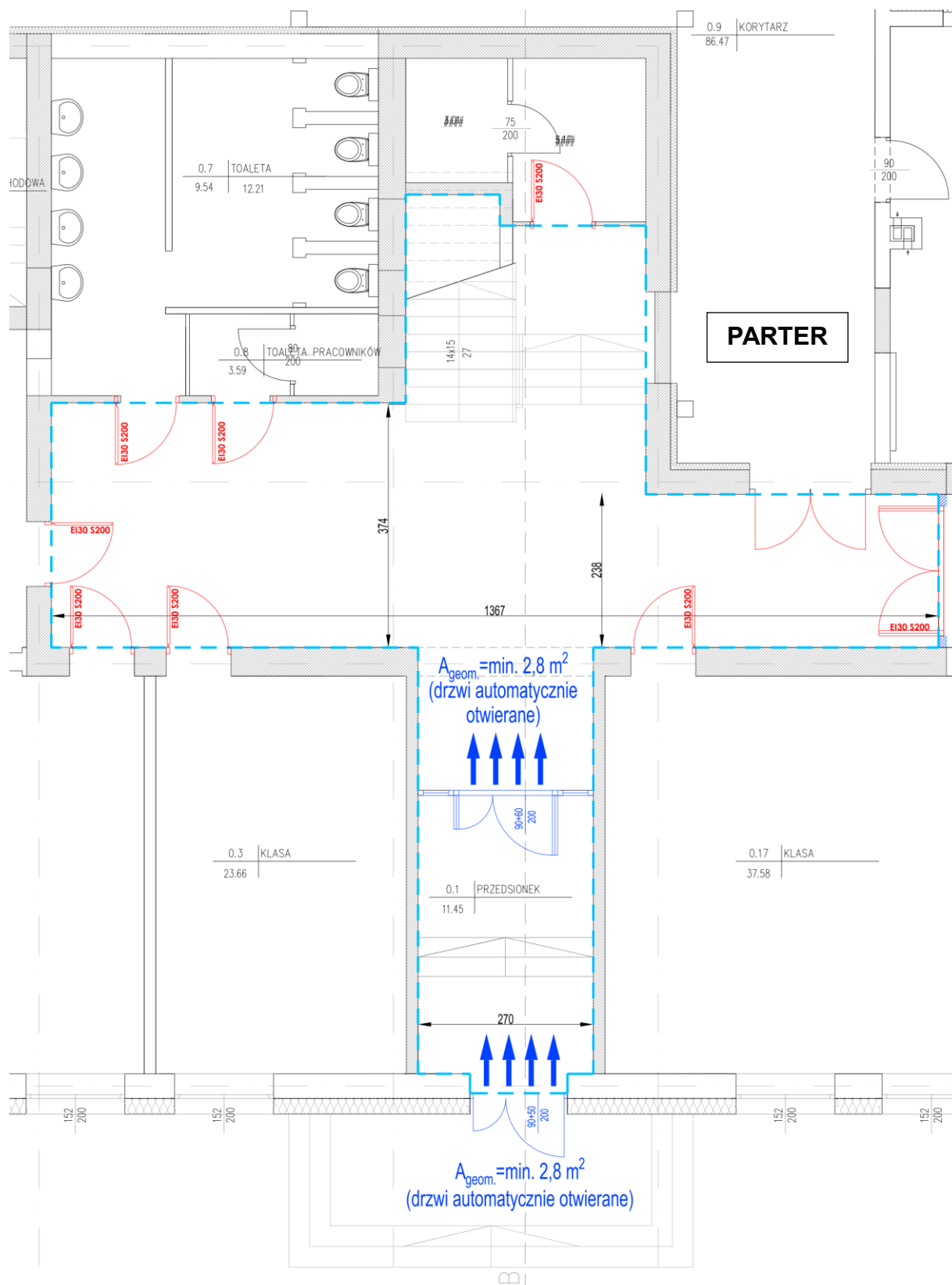
Komunikacja ogólna pomiędzy poszczególnymi kondygnacjami w rozpatrywanym obiekcie zapewniona jest poprzez klatkę schodową. Z poszczególnych kondygnacji zakłada się możliwość ewakuacji poprzez w/w klatkę schodową do wyjścia ewakuacyjnego zlokalizowanego na parterze, prowadzącego bezpośrednio na zewnątrz budynku.

### 2.4 Uwarunkowania działań ratowniczo-gaśniczych jednostek PSP

Rozpatrywany obiekt znajduje się w odległości ok. 7,5 km od Komendy Powiatowej Państwowej Straży Pożarnej w Brzezinach przy ul. Ludwika Waryńskiego 55 oraz ok. 6,0 km od OSP w Brzezinach przy ul. Reformackiej 9. W przypadku pożaru przewidywany czas dojazdu jednostek PSP nie powinien przekroczyć 15 minut.

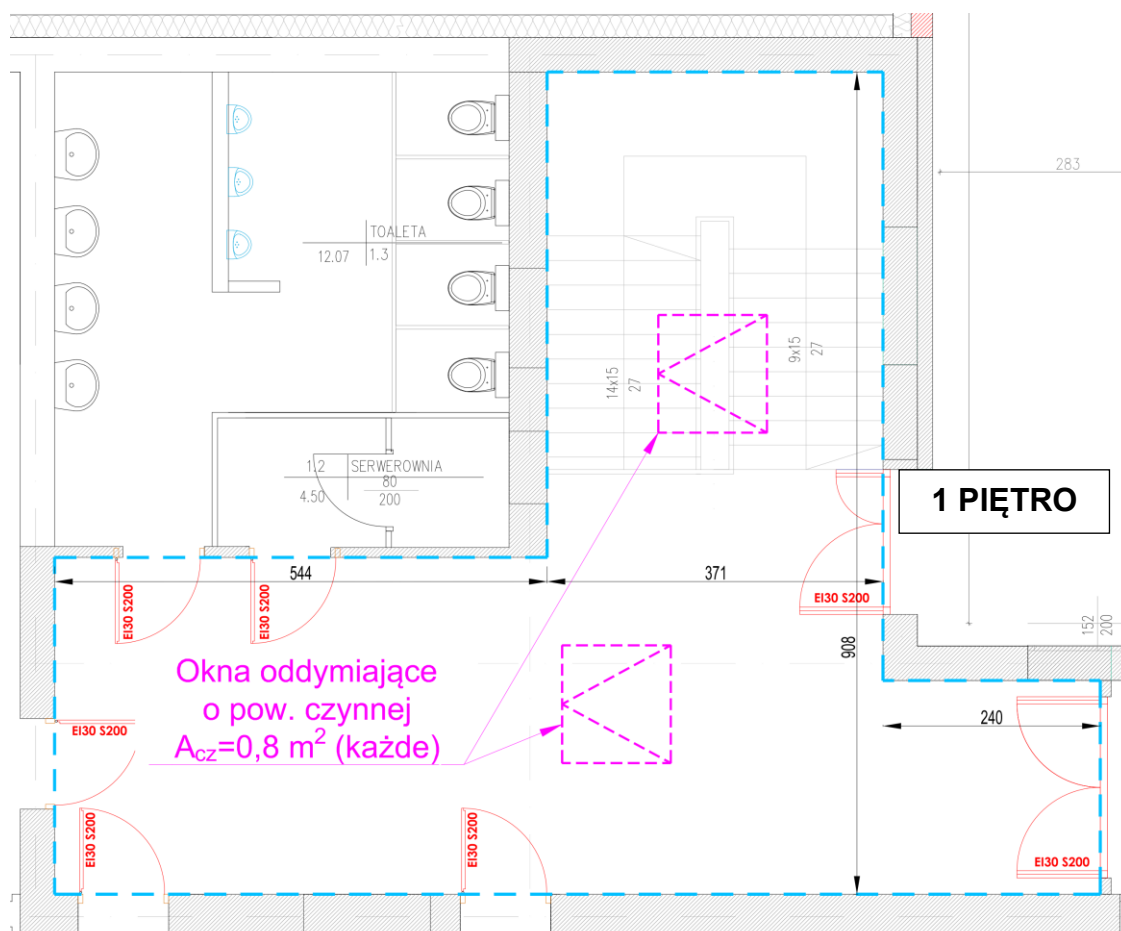


## 2.5 Rzuty i przekroje klatek schodowych wraz z elementami systemu oddymiania

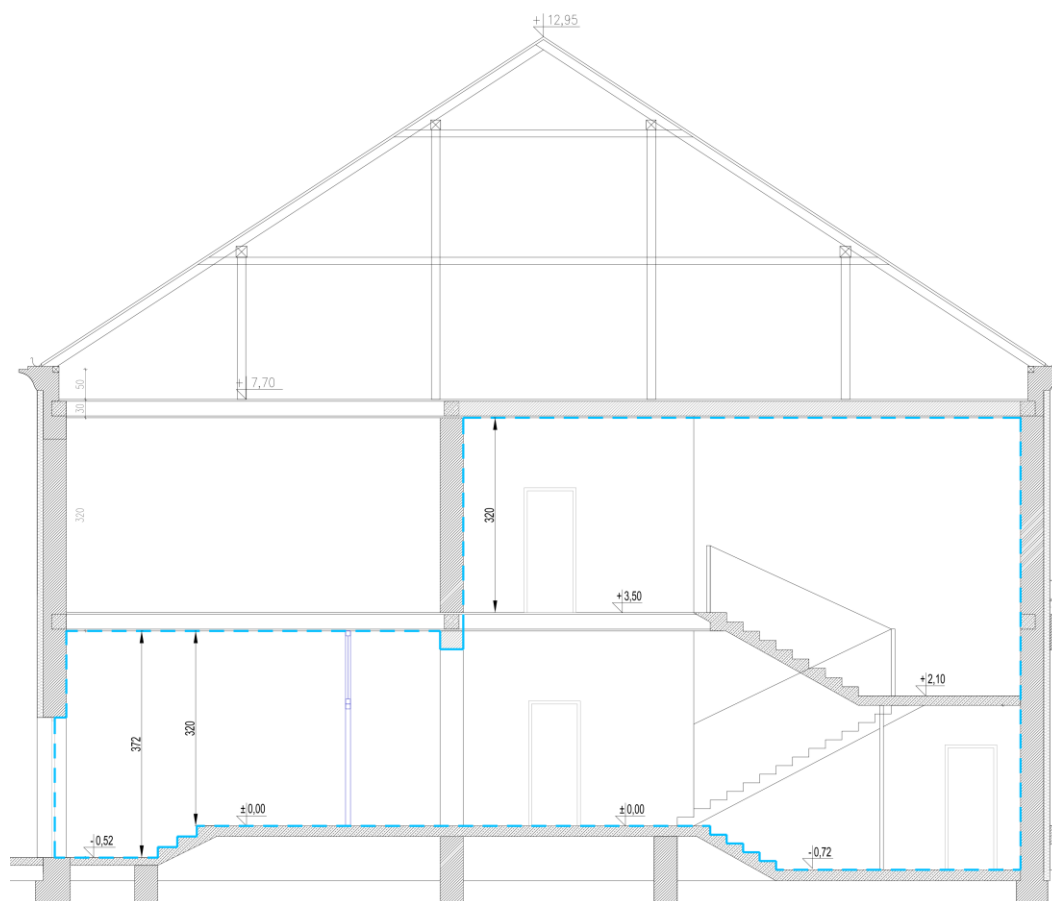


Rysunek 1. Obszar parteru rozpatrywanej klatki schodowej wraz z elementami systemu usuwania dymu





Rysunek 2. Obszar 1 piętra (+3,50 m) rozpatrywanej klatki schodowej wraz z elementami usuwania dymu



Rysunek 3. Przekrój B-B przez klatkę schodową



### 3.0 WSTĘPNE OBLICZENIA ANALITYCZNE WG WYTYCZNYCH CNBOP-PIB W-0003:2019

#### 3.1 Przyjęta metodyka obliczeń i weryfikacji

Na podstawie metodyki opisanej w Wytycznych CNBOP-PIB W-003:2019 – „Systemy oddymiania klatek schodowych” wstępnie obliczono parametry systemu usuwania dymu z klatki schodowej tj.: minimalną wymaganą powierzchnię czynną oddymiania (kłap dymowych) oraz minimalną wymaganą powierzchnię czynną otworu napowietrzającego (kompensacyjnego) służące do oczyszczenia klatki schodowej w przypadku chwilowego i ograniczonego napływu dymu do jej przestrzeni.

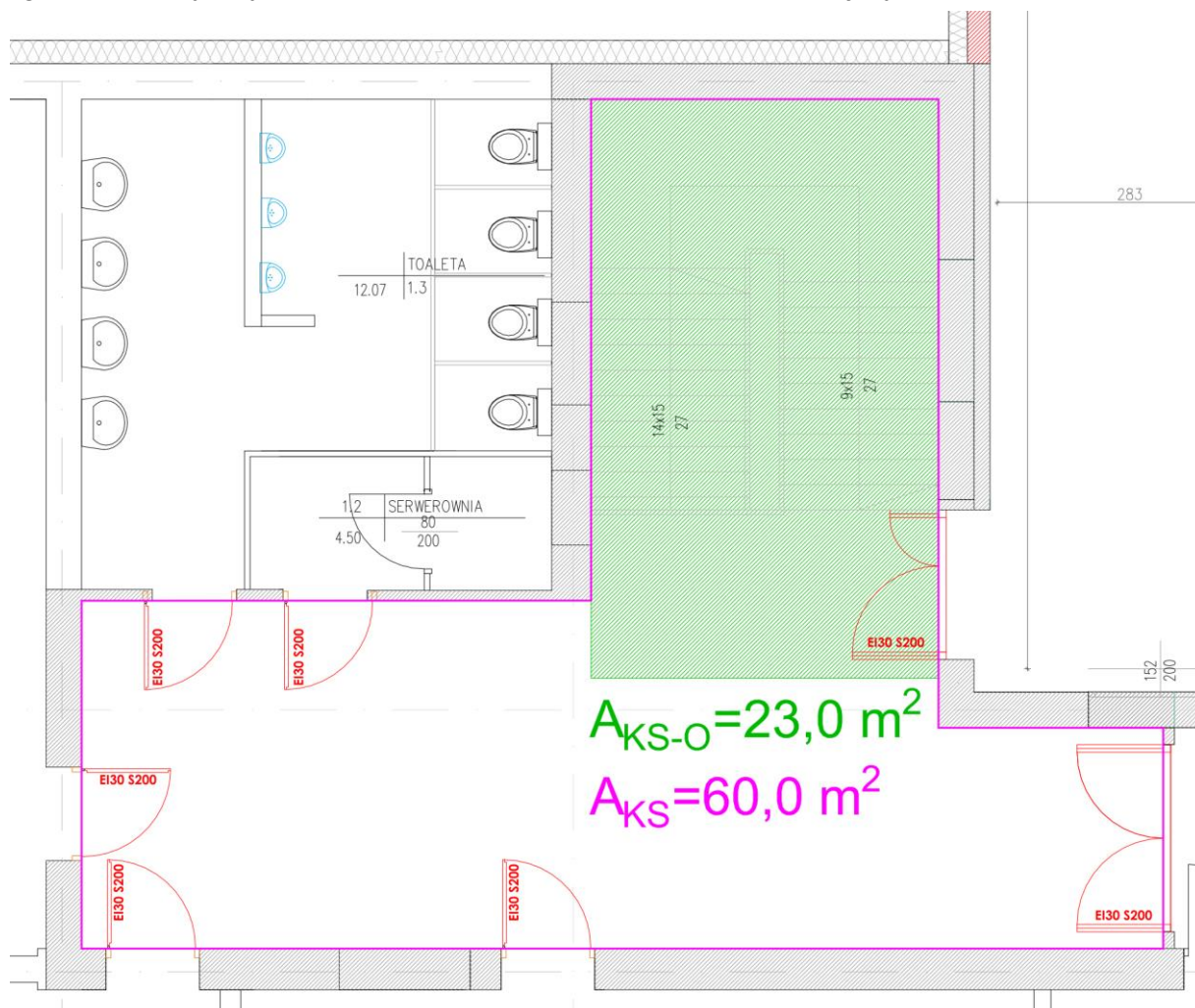
#### 3.2 Obliczenia analityczne

##### 3.2.1 Powierzchnia obliczeniowa klatki schodowej

Powierzchnia wewnętrzna geometryczna (maksymalna) analizowanej klatki schodowej wynosi ok. 62,0 m<sup>2</sup>.

Wyznaczono powierzchnię obliczeniową dla klatki schodowej ( $A_{KS-O}$ ) zgodnie z wytycznymi CNBOP-PIB W-0003:2019 jako największą (ze wszystkich pięter) sumę: powierzchni rzutu biegów schodów (A), minimalnej wymaganej powierzchni spoczników, wynikającej z geometrii klatki schodowej i wymaganej minimalnej szerokości użytkowej spocznika (B), powierzchni duszy schodów (D).

Zgodnie z powyższym powierzchnia obliczeniowa klatki schodowej wynosi:  $A_{KS-O}=23,0 \text{ m}^2$ .



Schemat 1. Rzut klatki schodowej (I piętro) wraz z zaznaczonym obszarem powierzchni geometrycznej (różowa obwiednia) oraz obliczeniowej klatki schodowej ( $A_{KS-O}$ ) - obszar zaznaczony na zielono.

### 3.2.2 Parametry urządzeń oddymiających

Powierzchnia czynna urządzeń oddymiających klatkę powinna wynosić co najmniej 5% powierzchni obliczeniowej klatki schodowej, jednak nie mniej niż 1 m<sup>2</sup>. Zgodnie z punktem 6.3.1 Wytycznych obliczono minimalną wymaganą powierzchnię czynną oddymiania.

$$A_{cz} = 5\% \cdot A_{KS-O} = 5\% \cdot 23,0 \text{ m}^2 = 1,15 \text{ m}^2.$$

Zakładając współczynnik  $c_v$  na poziomie ok. 0,55 co stanowi przeciętną wartość dla okien oddymiających o kącie rozwarcia 90°, wyznaczono minimalną wymaganą powierzchnię geometryczną okna oddymiającego:

$$A_{odd\_geo} = A_{cz} / c_v = 1,15 \text{ m}^2 / 0,55 = 2,1 \text{ m}^2$$

**Na podstawie symulacji CFD ostatecznie przyjęto 2 okna oddymiające o powierzchni czynnej  $A_{cz} = 2 \times 0,8 \text{ m}^2 = 1,6 \text{ m}^2$ , co stanowi 1,4 krotności minimalnej wymaganej wielkości.**

Zakłada się oddymianie przestrzeni klatki schodowej z wykorzystaniem okien oddymiających zlokalizowanych w dachu ponad klatką schodową, rozmieszczonych zgodnie z Wytycznymi CNBOP-PIB W-003:2019.

Istotna jest lokalizacja, tak aby jedna z klap znajdowała się nad duszą schodów a druga nad najwyższym spocznikiem (rys. 2).

### 3.2.3 Napływ powietrza kompensacyjnego dla systemu grawitacyjnego

Minimalna powierzchnia geometryczna drzwi, zgodnie z wytycznymi CNBOP-PIB W-0003:2019, powinna wynosić o 30% więcej względem powierzchni geometrycznej urządzeń oddymiających.

Minimalną powierzchnię geometryczną otworu kompensacyjnego obliczono jako:

$$\text{(wzór 6.8)} \quad A_{komp\_geom} = 1,3 \times A_{odd\_geom} = 1,3 \times 2,1 \text{ m}^2 = 2,73 \text{ m}^2$$

Zakłada się, że funkcję otworu napowietrzającego (kompensacyjnego) pełnić będą dwie pary szeregowo ustawionych drzwi otwartych pod kątem co najmniej 90°.

**Na podstawie symulacji CFD ostatecznie przyjęto minimalną wymaganą powierzchnię geometryczną otworu kompensacyjnego nie mniejszą niż 2,8 m<sup>2</sup>.**

## 4.0 OPIS PROGRAMU FDS

### 4.1 Nazwa i wersja programu

W przedmiotowej analizie wykorzystano program komputerowy Fire Dynamics Simulator (FDS) wersja 6.7.9 z czerwca 2022 r. oraz kompatybilny z nim pakiet wizualizacyjny Smokeview.

### 4.2 Podstawowe cechy programu FDS

FDS jest komputerowym programem opartym na metodzie CFD, przeznaczonym do analizy zjawisk związanych z rozprzestrzenianiem się dymu i ciepła w warunkach pożaru.

Program opracowany został przez National Institute of Standards and Technology (NIST) w Stanach Zjednoczonych, przy współpracy z fińskim instytutem naukowo - badawczym VTT. Od ponad 15 lat program FDS jest stale rozwijany i obecnie jest on jednym z najpopularniejszych modeli CFD stosowanych w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego.

Należy zaznaczyć, iż w procedurach organizacyjno-technicznych opublikowanych przez Biuro Rozpoznawania Zagrożeń Komendy Głównej PSP w sprawie spełnienia wymagań w zakresie bezpieczeństwa pożarowego w inny sposób niż to określono w przepisach techniczno-budowlanych [7], program FDS został dopuszczony do stosowania w szczegółowych analizach inżynierskich dotyczących wpływu pożarów na ludzi i mienie, a także w analizach wydajności systemów bezpieczeństwa pożarowego.

Wraz z programem FDS dostarczany jest pakiet Smokeview, który służy do graficznej prezentacji otrzymanych wyników.

W wykonanych symulacjach zastosowano tzw. wielkowirowy model turbulencji (LES).

Poniżej zamieszczono skrótowy opis kluczowych elementów systemu FDS. Szczegółowy opis programu zawarty jest w dokumentacji technicznej udostępnianej przez NIST.





### 4.3 Kluczowe modele matematyczno - fizyczne programu FDS

#### Model hydrodynamiczny

FDS rozwiązuje numerycznie układ równań Naviera - Stokesa właściwych dla przepływów o niskich prędkościach, typowych dla zjawisk transportu dymu i ciepła wymuszonych pożarem.

Solver programu rozwiązuje podstawowe równania zachowania masy, momentu i energii. Ze względu na to, iż powyższy układ równań nie może być rozwiązany metodami analitycznymi, konieczne jest zastosowanie metod numerycznych, w których domena obliczeniowa podzielona jest na trójwymiarową siatkę niewielkich komórek obliczeniowych. Solver programu oblicza warunki fizyczne odrębnie wewnątrz każdej komórki jako funkcję czasu.

Model turbulencji zastosowany w przedmiotowych symulacjach oparty jest na wersji Deardorff'a metody symulacji wielkowirowych (LES).

Równania transportu rozwiązywane w symulacjach LES są otrzymywane po przefiltrowaniu zależnych od czasu równań Naviera - Stokesa. Podczas procesu filtrowania wiry, których wielkość jest mniejsza od rozmiaru siatki obliczeniowej nie są bezpośrednio obliczane, a uśrednione skutki ich działania są ujmowane w tak zwanym modelu podsiatkowym.

#### Model spalania

W przedmiotowej symulacji wykorzystano jednostopniowy model spalania bazujący na zachowywanej wielkości skalarnej  $Z$  (ang. *mixture fraction*). Wielkość ta, wyznaczana dla każdej komórki obliczeniowej, określa jaką część gazu w danym punkcie przestrzeni jest paliwem lub też produktem spalania paliwa. Powyższy model spalania oparty jest na założeniu, iż proces spalania zależy od możliwości mieszania się substratów (tj. paliwa oraz tlenu). Zakłada on również, iż reakcja paliwa z tlenem przebiega nieskończenie szybko.

#### Model radiacji

Równanie opisujące transport ciepła poprzez radiację jest rozwiązywane numerycznie przy użyciu algorytmu podobnego do Metody Objętości Skończonych. Transport ciepła poprzez radiację jest analizowany w 100 zdyskretyzowanych kierunkach, co pozwala na osiągnięcie dobrych rezultatów bez nadmiernych nakładów mocy obliczeniowej.

#### Warunki brzegowe

Wszystkim powierzchniom ciał stałych wewnątrz domeny obliczeniowej przypisane są właściwości fizyczne (gęstość, przewodność cieplna oraz ciepło właściwe), a także informacje dotyczące ich podatności na proces spalania.

Transport masy i ciepła z i do powierzchni ciał stałych (np. ścian, sufitów i innych obiektów znajdujących się w danej domenie obliczeniowej) opisywany jest uproszczonymi wzorami empirycznymi.

### 4.4 Sposób definicji modelu

Geometria rozpatrywanego obiektu oraz wszystkie parametry wymagane do opisu danego scenariusza są wprowadzane do programu w postaci pliku wsadowego, który jest plikiem tekstowym tworzonym przez użytkownika.

Domena obliczeniowa, w której przeprowadzana jest symulacja opisywana jest zazwyczaj przy pomocy kilku połączonych siatek obliczeniowych.

Program FDS bazuje na siatce strukturalnej prostopadłościennych. W przedmiotowej analizie wykorzystano siatki jednorodne.

Wszystkie elementy geometrii rozpatrywanego obiektu muszą ściśle pokrywać się z komórkami siatki obliczeniowej. Poszczególne elementy budynku takie jak ściany, stropy, słupy czy podciągi są reprezentowane przez jeden lub kilka prostopadłościennych „bloków” o cechach materiałowych odpowiadających danemu elementowi.

Warunki brzegowe mogą być przypisywane do zadanych obszarów na granicy domeny obliczeniowej lub do powierzchni „bloków” reprezentujących ściany, stropy itd.





## 4.5 Weryfikacja programu FDS

Poprawność działania programu FDS została szczegółowo zweryfikowana przez NIST oraz inne ośrodki naukowo-badawcze. W ramach weryfikacji programu FDS dokonano min.:

Porównania wyników symulacji z wynikami eksperymentów w skali naturalnej przeprowadzonych specjalnie na potrzeby weryfikacji programu;

Porównania wyników symulacji z wynikami innych eksperymentów w skali naturalnej i laboratoryjnej, których wyniki opublikowano w literaturze naukowo-technicznej;

Porównania wyników symulacji z obserwacjami dokonanymi podczas zaistniałych pożarów.

W przypadku typowych symulacji dla celów inżynierskich, w których rozpatrywany jest jedynie transport dymu i ciepła, program FDS wyznacza prędkości przepływu i temperatury w zależności od przyjętej rozdzielczości siatki obliczeniowej.

## 5.0 OPIS ZAŁOŻEŃ PRZYJĘTYCH W ANALIZIE NUMERYCZNEJ

### 5.1 Przyjęta metodyka analizy

Analizę numeryczną CFD rozprzestrzeniania się dymu i ciepła w obrębie rozpatrywanej klatki schodowej, mającą na celu sprawdzenie skuteczności proponowanego systemu usuwania dymu, przeprowadzono bazując na wytycznych i zaleceniach zawartych w Rozdziale 7. („Zasady prowadzenia analizy numerycznej dla systemów oddymiania klatek schodowych”) Wytycznych CNBOP-PIB W-0003:2019.

### 5.2 Założenia wynikające z dostępnych danych dotyczących obiektu

Geometrię rozpatrywanej części budynku – klatki schodowej - na potrzeby stworzenia modelu komputerowego przyjęto na podstawie rysunków projektu budowlanego autorstwa pracowni Powersun Sp. z o.o. z sierpnia 2023 roku oraz innych materiałów przekazanych przez Zleceniodawcę.

Przyjęto wykonanie wszystkich drzwi prowadzących z innych pomieszczeń do przedmiotowych klatek schodowych w klasie odporności ogniowej zgodnej z informacjami zawartymi w projekcie.

W przypadku zmiany w zakresie przyjętych do analizy założeń opisanych w niniejszym opracowaniu, w tym m.in. geometrii klatki schodowej należy przeanalizować wpływ tych zmian na otrzymane wyniki.

### 5.3 Obciążenie ogniowe

Nie zakłada się występowania jakiegokolwiek obciążenia ogniowego oraz materiałów palnych w obrębie klatki schodowej (szczegółowy opis przyjętego pożaru testowego podano w punkcie 5.6).

### 5.4 Aktywne systemy ochrony przeciwpożarowej

Parametry przyjęte do analizy bazują na założeniu, iż Zarządca budynku będzie utrzymywał systemy bezpieczeństwa pożarowego w stanie sprawności technicznej, w tym przeprowadzał przewidziane w przepisach i dokumentacji tych systemów przeglądy techniczne.

Zakłada się, że obiekt, w tym w szczególności obszar klatki schodowej, będzie wyposażony w systemy bezpieczeństwa przeciwpożarowego wymagane obowiązującymi przepisami.

Istotny, ze względu na przyjęte do analizy założenia, jest system sygnalizacji pożarowej (lub system detekcji dymu), umożliwiający detekcję pożaru oraz aktywujący automatycznie system usuwania dymu w klatce schodowej (otwarcie kłapy dymowej na dachu klatki schodowej oraz otwarcie otworów napowietrzających na poziomie parteru). Zakłada się samoczynne i jednoczesne uruchamianie się elementów systemu oddymiania klatki schodowej

Szczegółowe wytyczne dotyczące scenariusza działania systemów technicznych ochrony przeciwpożarowej (w tym systemów usuwania dymu z klatek schodowych) powinny zostać określone w oparciu o dokument opisujący scenariusze pożarowe i uwzględniać strategię oraz procedury ewakuacyjne.



## 5.5 Założenia dotyczące warunków początkowych wewnątrz i na zewnątrz obiektu

Na podstawie lokalizacji budynku (Lipiny) ustalono warunki temperaturowe dla których wykonywano symulacje zgodnie z wytycznymi CNBOP-PIB W-0003:2019 oraz normą PN-76/B-03420.

- Warunki letnie - strefa II;
- Warunki zimowe – strefa III.

Zgodnie z pkt. 7.3.4 Wytycznych CNBOP-PIB W-0003:2019, rozważono 3 grupy warunków początkowych odpowiadające różnym okresom klimatycznym:

Okres klimatyczny	Temperatura powietrza zewnętrznego	Temperatura początkowa przegród oraz powietrza wewnętrznego
Warunki izotermiczne	+20°C	+20°C
Warunki letnie	+30°C	+24°C
Warunki zimowe	-20°C	+16°C

Tabela 1. Zestawienie tabelaryczne zakładanych w symulacji temperatur na podstawie PN-76/B-03420

Różnica temperatur pomiędzy wewnętrzną i zewnętrzną częścią klatki schodowej w istotny sposób wpływa na kierunek i czas wypływu dymu. W przypadku warunków zimowych ciąg kominowy powstający wewnątrz klatki powoduje przepływ ciepłego powietrza w kierunku klap dymowych, natomiast w warunkach letnich odwrotny ciąg kominowy dąży do wypływu chłodniejszego (względem otoczenia) powietrza przez drzwi wejściowe.

## 5.6 Pożar testowy

W poniższych analizach założono jako źródło dymu pożar testowy. Zgodnie z wytycznymi CNBOP-PIB W-0003:2019, w przypadku budynku o dwóch kondygnacjach nadziemnych, umiejscowiono pożar testowy na pierwszej kondygnacji nadziemnej (parter), wewnątrz klatki schodowej (lokalizacja widoczna na rys. 5).

Zgodnie z pkt. 7.1 wytycznych CNBOP-PIB W-0003:2019 w budynkach nie zakłada się wystąpienia pożaru w obrębie klatki schodowej. Jednakże w celu umożliwienia oceny skuteczności systemu usuwania dymu za pomocą analiz numerycznych CFD, przyjęto źródło niewielkiego pożaru testowego zlokalizowanego w przestrzeni klatki schodowej. W związku z powyższym niniejszej analizy nie należy rozpatrywać jako oceny warunków ochrony przeciwpożarowej.

### 5.6.1 Parametry pożaru testowego

W tabeli 2 podsumowano podstawowe wartości charakterystycznych parametrów pożaru przyjętych w analizie. Rysunek nr 4 przedstawia krzywą rozwoju pożaru uzyskaną w analizie CFD. Lokalizację pożaru projektowego pokazano na rys. 5.

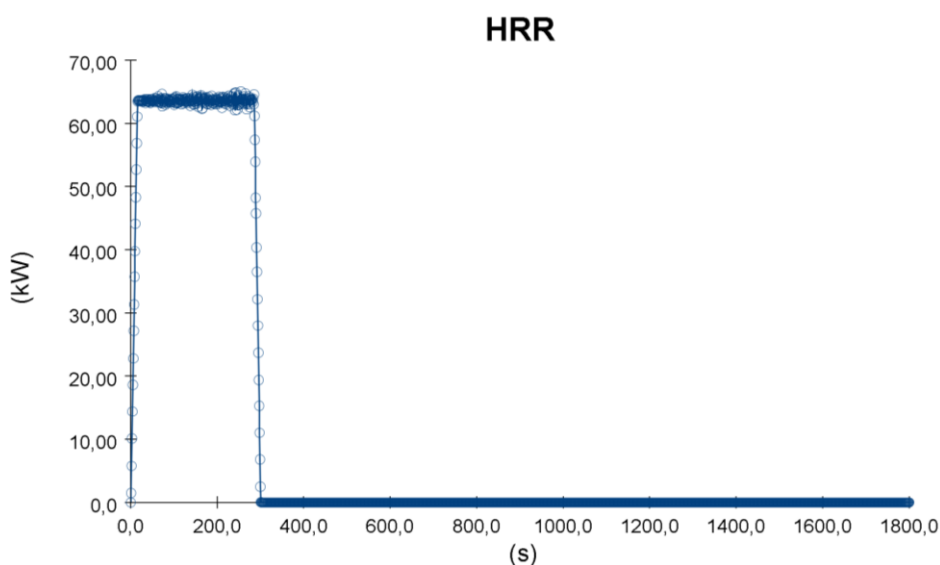
Moc całkowita pożaru	Moc konwekcyjna pożaru	Powierzchnia pożaru	Gęstość mocy pożaru na jednostkę powierzchni	Historia / krzywa rozwoju pożaru	Czas do osiągnięcia przez pożar mocy maksymalnej	Czas w którym następuje spadek mocy pożaru
$Q_{tot}$	$Q_{conv}$	$A_f$	HRRPUA		$t(HRR_{const})$	$t(HRR_{decay})$
63,60 kW	44,52 kW	0,12 m <sup>2</sup>	530 kW/m <sup>2</sup>	wg wytycznych CNBOP-PIB W-0003:2019	po czasie 15 s	po czasie 285 s

Tabela 2. Podstawowe wartości charakterystycznych parametrów pożaru testowego



### 5.6.2 Krzywa rozwoju pożaru

Zastosowano krzywą rozwoju pożaru zgodną z wytycznymi CNBOP-PIB W-0003:2019.



Rys. 4. – Krzywa rozwoju pożaru (zależność mocy całkowitej pożaru od czasu) uzyskana w analizie CFD (kW w jednostce czasu)

### 5.6.3 Część energii wydzielanej przez promieniowanie cieplne

Proporcja pomiędzy częścią energii wydzielonej z pożaru poprzez promieniowanie cieplne, w stosunku do mocy całkowitej pożaru determinowana jest w programie FDS poprzez zmienną **RADIATIVE\_FRACTION**. W przedmiotowej analizie przyjęto wartość tej zmiennej równą **0.30**, zgodnie z 7.3.2. Wytycznych CNBOP.

### 5.6.4 Współczynnik emisji dymu oraz rodzaj paliwa pożaru testowego

W przedmiotowej analizie przyjęto współczynnik emisji dymu / dymotwórczości opisywany w programie FDS jako zmienna **SOOT\_YIELD** na poziomie **0,05 kg<sub>dymu</sub> / kg<sub>paliwa</sub>**. Skład chemiczny (na potrzeby stechiometrii reakcji) **C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH** (jak dla etanolu). Powyższa wartość dymotwórczości oraz rodzaj paliwa są zgodne z zalecaniami podanymi w punkcie 7.3.2. Wytycznych CNBOP.

### 5.6.5 Ciepło spalania

W przeprowadzonych analizach wynikowa wartość ciepła spalania (zmienna w programie FDS: **HEAT\_OF\_COMBUSTION**) wynosi **26 780 kJ/kg**.



## 5.7 Czas trwania symulacji i przebieg analizy

Symulacje prowadzono przez czas 1800 s.

W niniejszym opracowaniu zaprezentowano wyniki analizy dla czasu do chwili całkowitego usunięcia dymu z przestrzeni klatki schodowej od początku zapłonu źródła pożaru testowego, w odniesieniu do kryterium opisanego w pkt. 5.10.

Analiza numeryczna przewiduje aktywację systemu usuwania dymu w 360 s od chwili zapłonu pożaru testowego – zgodnie z Wytycznymi CNBOP-PIB W-0003:2019.

## 5.8 Siatka obliczeniowa

W rozpatrywanych analizach domenę obliczeniową opisano przy użyciu siatki o rozdzielczości 0,10 m x 0,10 m x 0,10 m dla wszystkich obszarów rozpatrywanej kubatury klatki schodowej. Sumaryczna liczba komórek w obrębie domeny obliczeniowej wyniosła ok. 1,0 mln.

Wielkość komórki obliczeniowej zbieżna z zaleceniami Wytycznych CNBOP co do maksymalnej dopuszczalnej wielkości komórki obliczeniowej.

Wartość współczynnika kształtu komórki dla siatek obliczeniowych wynosi 1.0, co jest zgodne z zaleceniami zawartymi w literaturze [1].

## 5.9 Model obliczeniowy i geometria przestrzeni

Model obliczeniowy powstał na podstawie otrzymanej dokumentacji i odwzorowuje swoim kształtem projektowany obiekt z dokładnością i uproszczeniami uwzględniającymi ograniczenia wynikające z proporcji i wielkości siatki obliczeniowej oraz jej poszczególnych komórek.

Przestrzeń uwzględniona w obliczeniach CFD ograniczona jest do przestrzeni, w której następuje rozprzestrzenianie się dymu, tj.: obszaru klatki schodowej, w której zlokalizowano pożar testowy.

W modelu numerycznym uwzględniono właściwości fizyczne materiałów tworzących przegrody: betonu, izolacji, szkła.

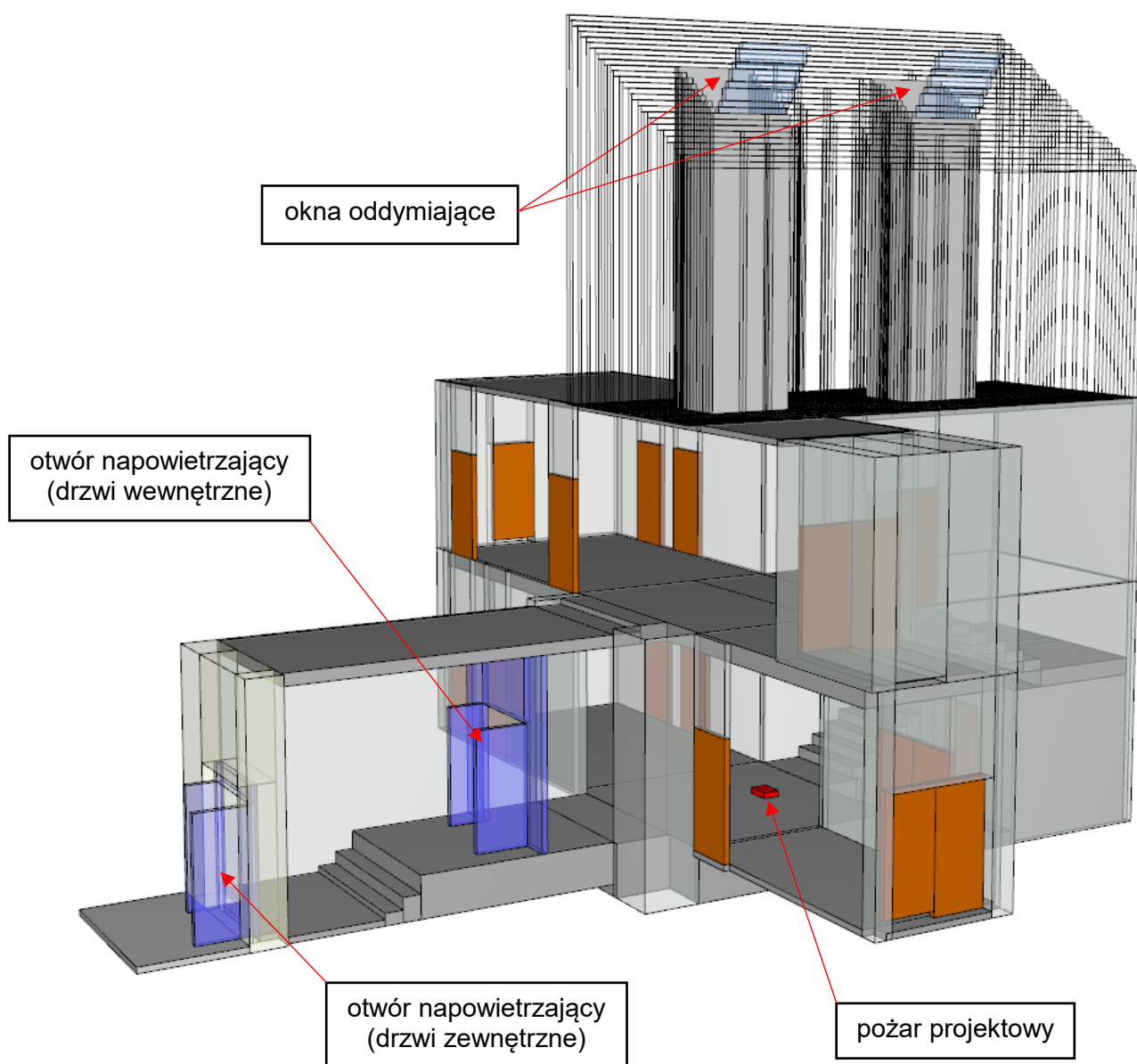
Elementy systemu usuwania dymu:

- Drzwi zewnętrzne stanowiące otwór napowietrzający (kompensacyjny) odwzorowano jako otwór o wymiarach odpowiadających zaprojektowanym drzwiom wejściowym: (90+50) x 200 cm. Drzwi wewnętrzne do klatki schodowej odwzorowano jako otwór o wymiarach: (90+60) x 200 cm;
- Dwa okna oddymiające zamodelowano jako otwory w dachu o wymiarach: 2 szt. 1300x1200 i kącie rozwarcia 90° (okna uchylne górą na zewnątrz).

Warunki brzegowe:

- W niniejszej analizie przyjęto nieszczelności niewielkich rozmiarów – zgodnie z tab. 3 w Załączniku 2 do Wytycznych CNBOP-PIB W-0003:2019 - (odwzorowujące mogące wystąpić w rzeczywistości nieszczelności przegród i zamknięć otworów, zapewniające stabilizację warunków ciśnienia wewnątrz kubatury klatki schodowej).
- Środowisko zewnętrzne (przestrzeń poza kubaturą klatki schodowej) w niniejszych analizach reprezentują płaszczyzny typu OPEN umożliwiające swobodną migrację dymu poza obszar domeny obliczeniowej w dowolnym kierunku.





Rys. 5. Widok modelu obliczeniowego klatki schodowej wraz z lokalizacją pożaru projektowego (czerwone pole, parter)

## 5.10 Kryteria skuteczności działania systemu oddymiania klatki schodowej

Zgodnie z wytycznymi CNBOP-PIB W-0003:2016, wyd.2 należy określić czas po którym dym zostanie usunięty z przestrzeni klatki schodowej, przy czym nie stawia się ograniczeń co do wymaganego maksymalnego czasu usuwania dymu.

Czas ten wyznaczany jest jako czas liczony od momentu uruchomienia systemu (automatycznego otwarcia klap dymowych oraz automatycznego otwarcia drzwi kompensacyjnych), po którym w przestrzeni klatki schodowej zostanie usunięty dym. Stopień oczyszczenia klatki schodowej z dymu ocenia się na podstawie pomiaru transmitancji światła czyli parametru określającego jaka część światła zostaje przepuszczona przez ośrodek (dym) w porównaniu do światła padającego. Klatka zostaje uznana za oczyszczoną z dymu w momencie kiedy liniowy pomiar transmitancji na wysokości 2,0 m nad spocznikiem ostatniej kondygnacji klatki schodowej osiągnie wartość 95%/m.

Dodatkowo w związku z tym, że w przypadku warunków temperaturowych letnich, odwrotny ciąg kominowy powstający w przestrzeni klatki może prowadzić do wypływu dymu przez otwory kompensacyjne, umiejscowiono dodatkowe czujniki transmitancji w dolnej części klatki schodowej. Pozwalają one na ocenę stopnia oczyszczenia klatki schodowej z dymu w przypadku wypływu dymu przez drzwi wejściowe. Czujniki umieszczono w klatce na poziomie parteru na wysokości 2,0 m nad poziomem posadzki.

W związku z przyjętym pożarem testowym, przedmiotowa analiza służy wyłącznie ocenie skuteczności działania proponowanego systemu i nie należy jej rozpatrywać pod kątem oceny warunków ochrony przeciwpożarowej. Niniejsza analiza nie stanowi podstawy oceny warunków ewakuacji i działania ekip ratowniczo-gaśniczych.

Ponadto typowo dla analiz CFD, oraz min. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 17 czerwca 2011 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane metra i ich usytuowanie warunki bezpiecznej ewakuacji oceniono także na podstawie kryterium widzialności na wysokości 1,80 m nad posadzką. Przyjęto wartości odpowiednio:

- Zasięg widzialności co najmniej 10 m (dla elementów odbijających światło);

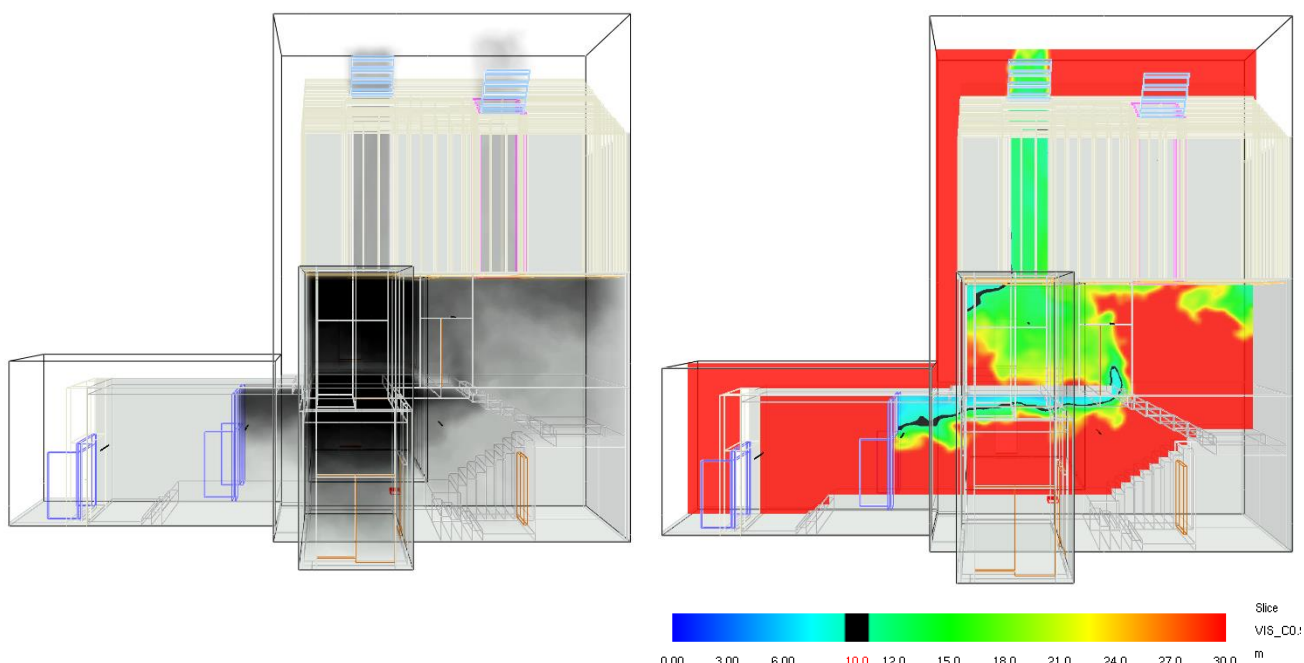
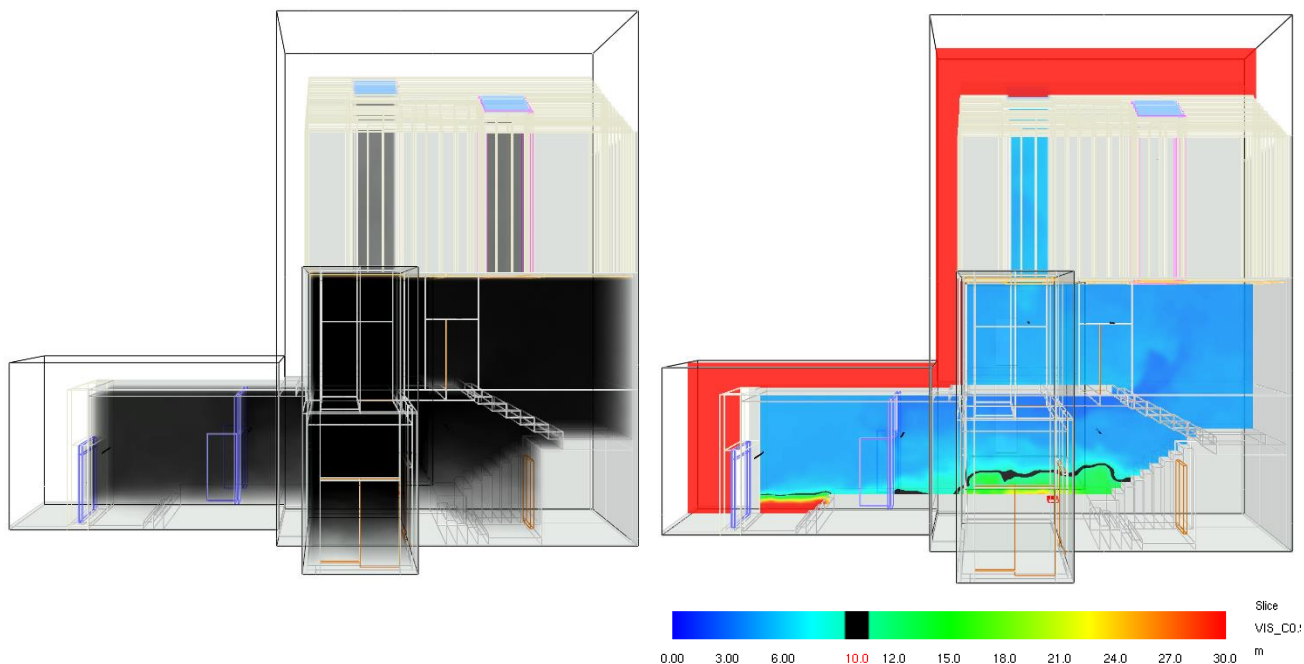
Kryterium temperatury (60°C dla przypadku klatki schodowej nie jest brane pod uwagę – temperatury nie przekraczają dopuszczalnych wartości).



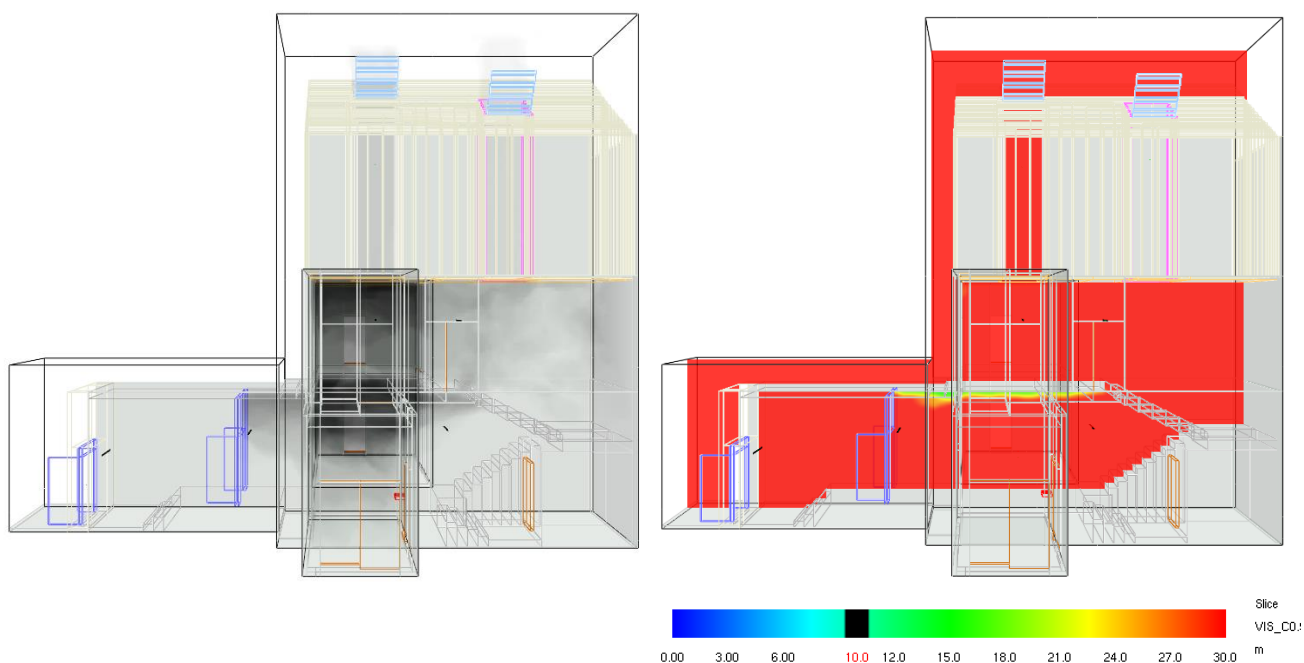
## 6.0 WYNIKI SYMULACJI CFD

### 6.1 Analiza dla warunków izotermicznych

23-129\_Lipiny\_KL2\_izo\_v3.fds

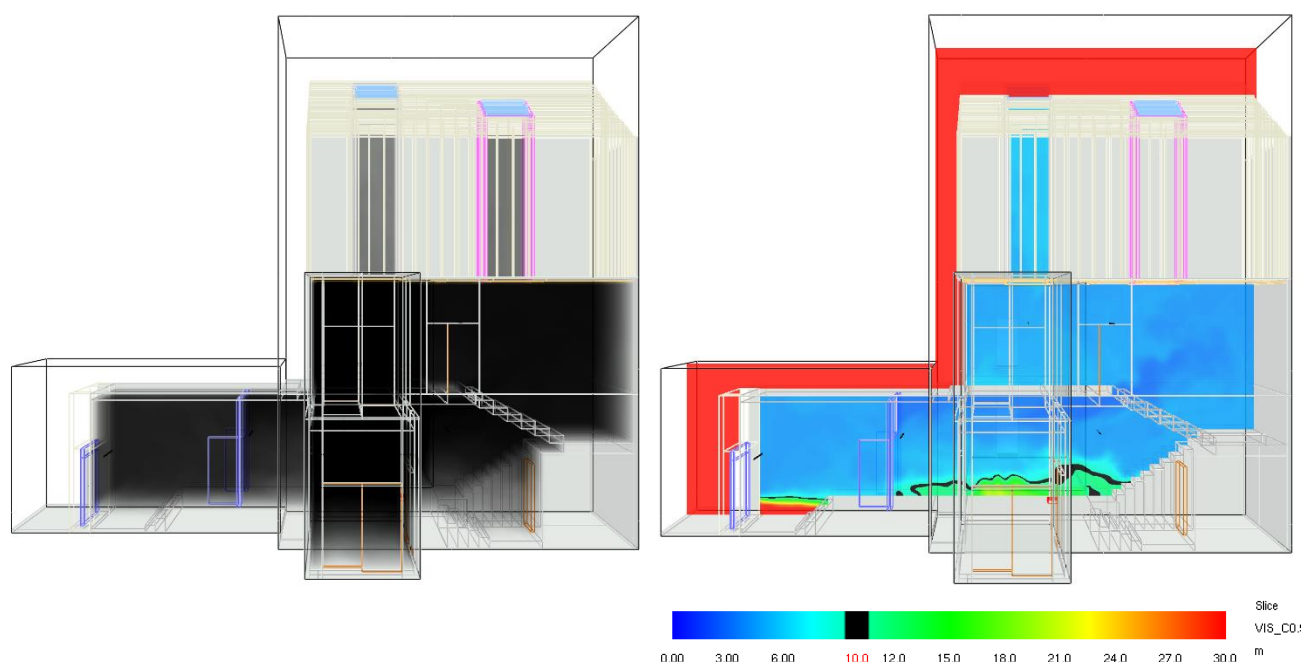


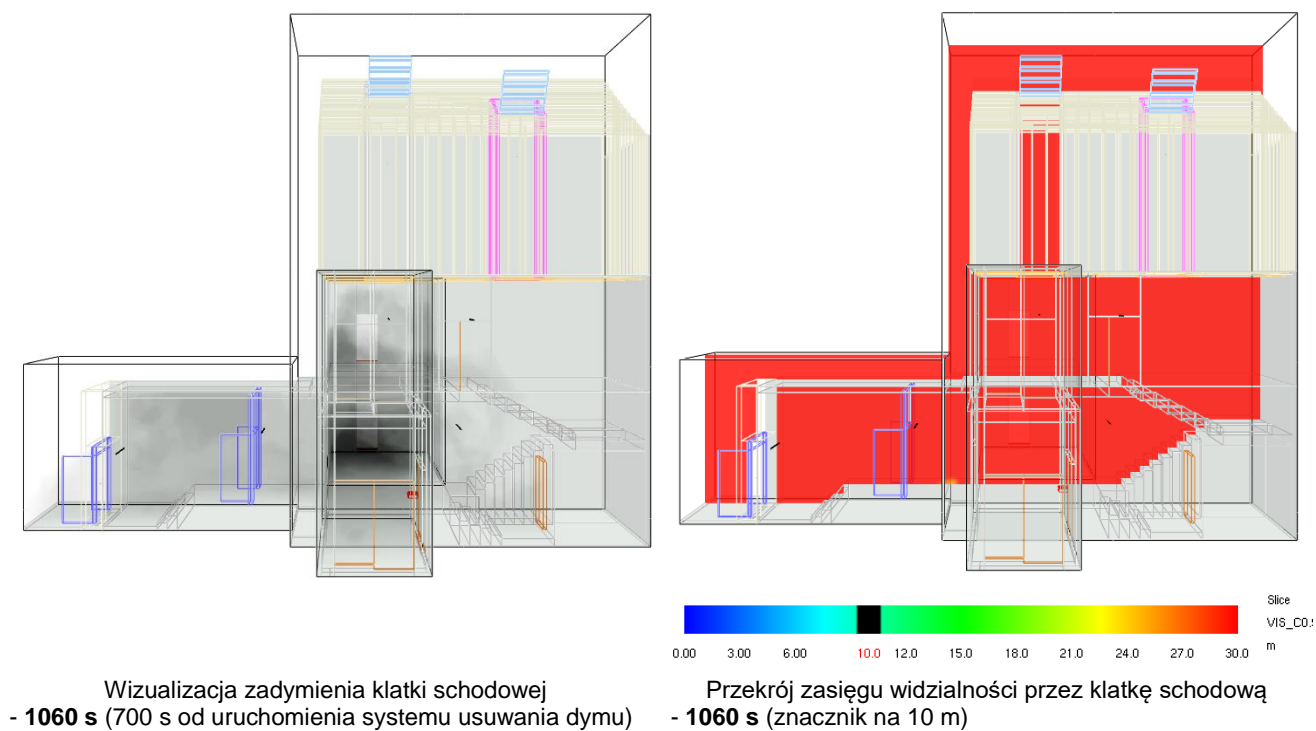
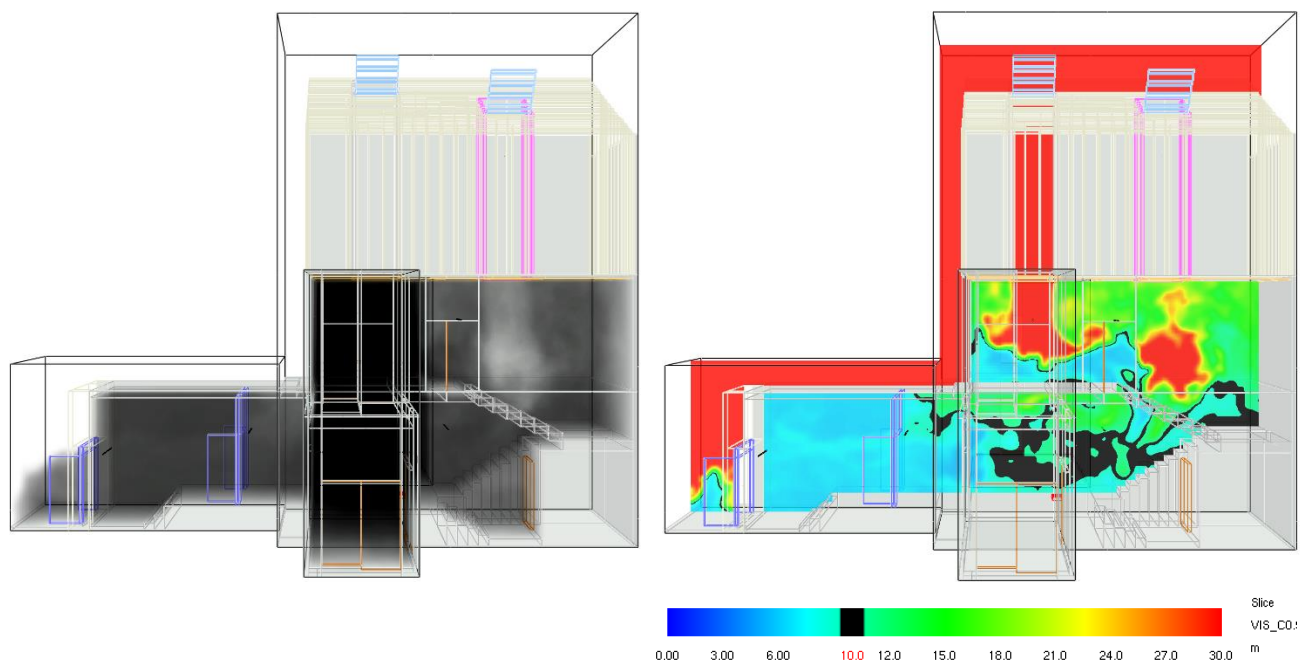




## 6.2 Wyniki dla warunków letnich

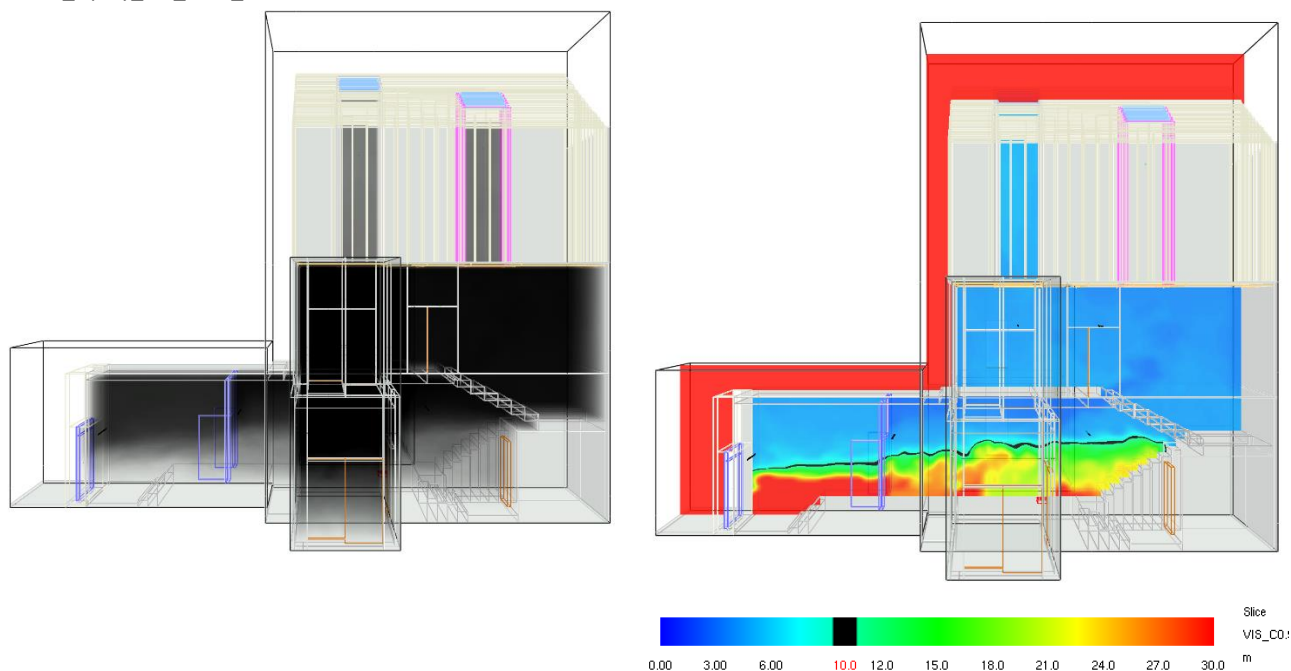
23-129\_Lipiny\_Kl2\_lato\_v3.fds





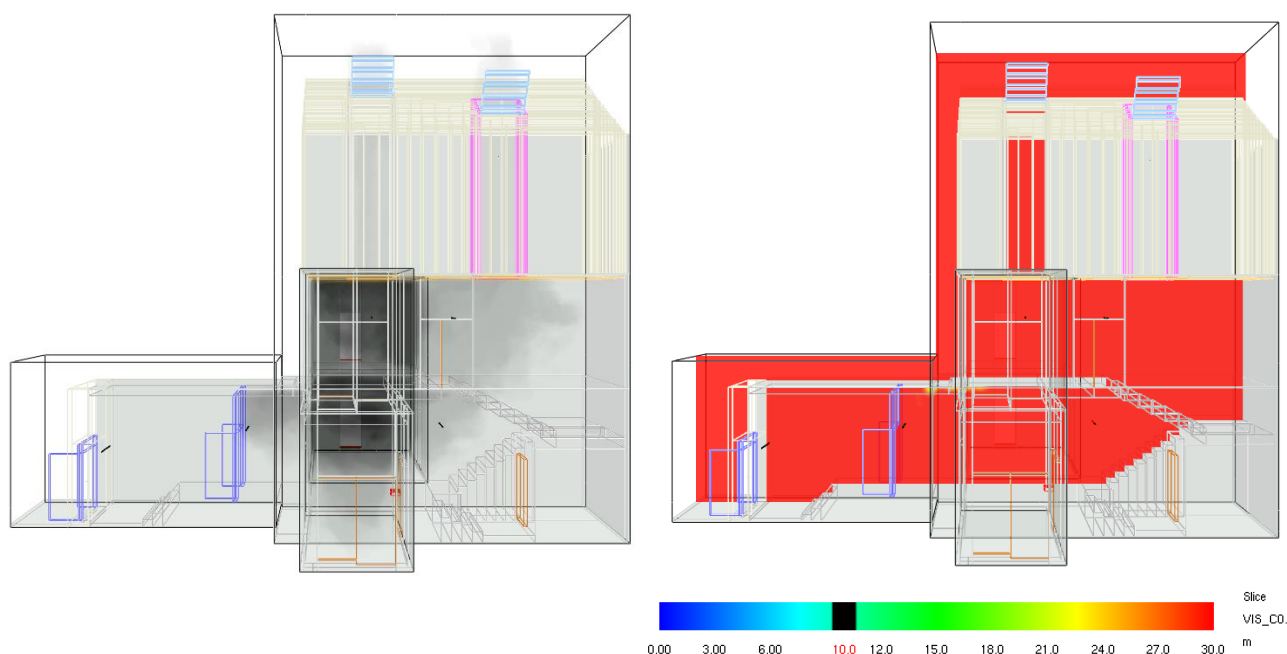
### 6.3 Wyniki dla warunków zimowych

23-129\_Lipiny\_KI2\_zima\_v3.fds



Wizualizacja zadymienia klatki schodowej  
- 360 s (przed uruchomieniem systemu usuwania dymu)

Przekrój zasięgu widzialności przez klatkę schodową  
- 360 s (znacznik na 10 m)



Wizualizacja zadymienia klatki schodowej  
- 495 s (135 s od uruchomienia systemu usuwania dymu)

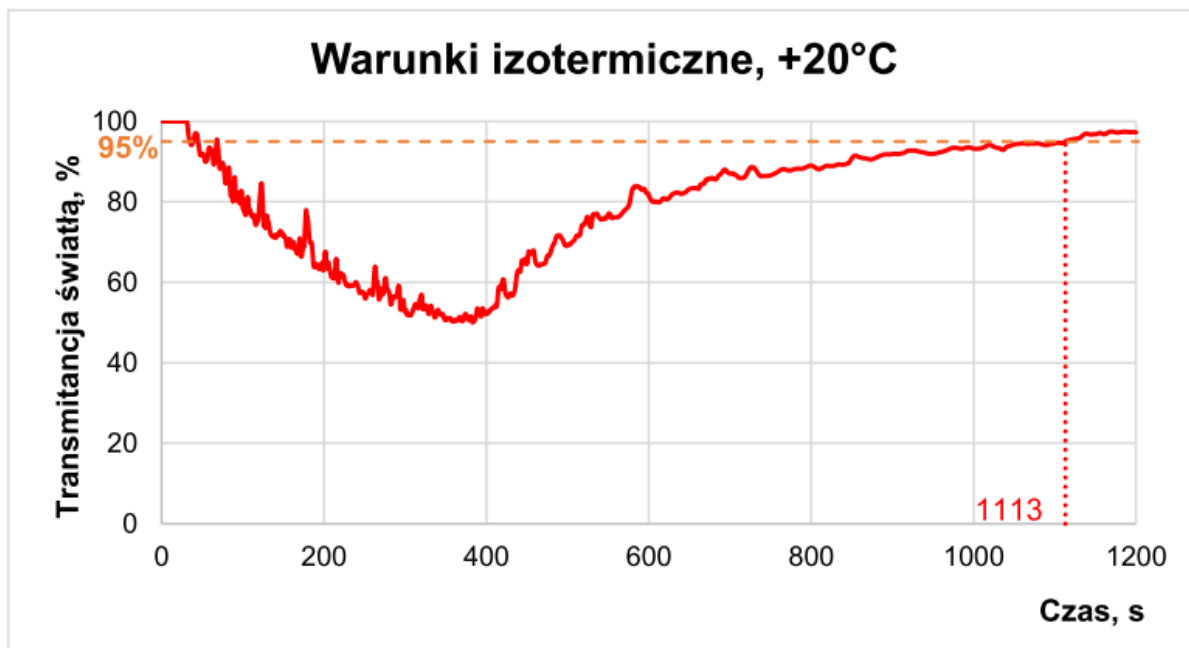
Przekrój zasięgu widzialności przez klatkę schodową  
- 495 s (znacznik na 10 m)



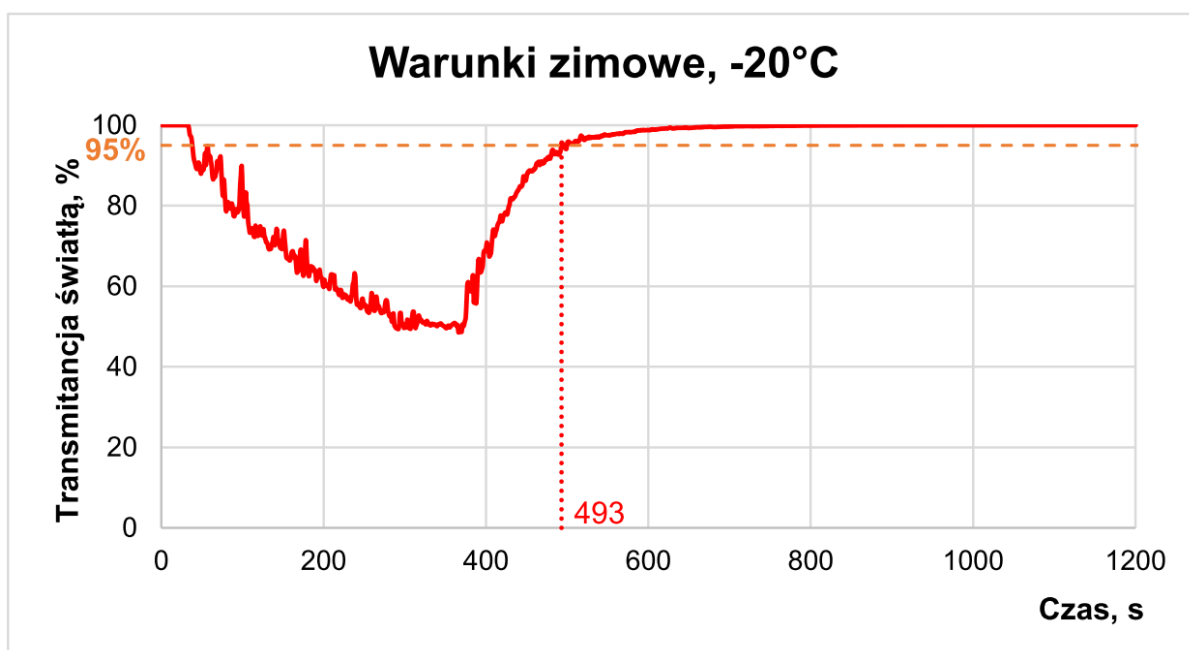
#### 6.4 Wykresy transmitancji światła dla poszczególnych warunków temperaturowych

Zgodnie z wytycznymi CNBOP-PIB W-0003:2016, wyd.2 (pkt. 7.3.6) uznaje się, że klatka jest oczyszczona z dymu, gdy wynik liniowego pomiaru transmitancji światła na wysokości 2,0 m powyżej spocznika ostatniej kondygnacji wynosi co najmniej 95%/m (kolor czerwony na wykresach).

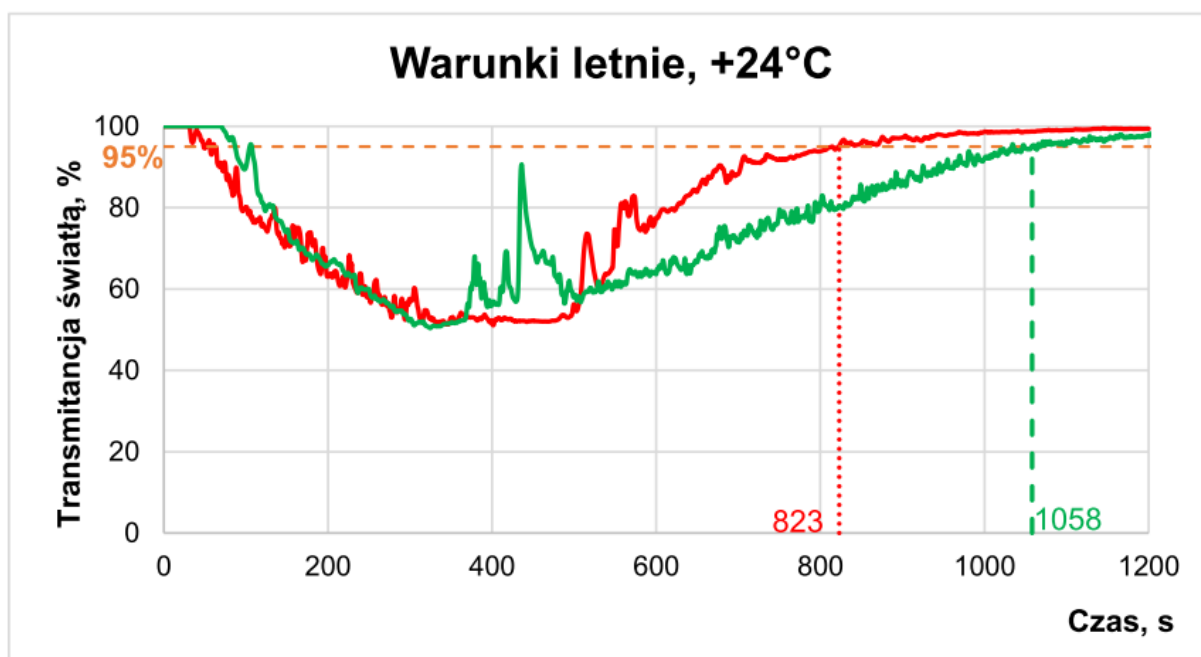
W przypadku symulacji dla letnich warunków temperaturowych przedstawiono również wyniki czujki transmitancji umieszczonej na poziomie parteru na wysokości 2,0 m nad posadzką (kolor zielony), w celu wyznaczenia czasu wypływu całości dymu z przestrzeni klatki przez drzwi wejściowe.



Powyższy warunek dla warunków izotermicznych został spełniony po 1113 s trwania symulacji, czyli po **753 s** od momentu uruchomienia oddymiania.



Dla warunków zimowych pomiar transmitancji światła wyniósł 95% po 493 s trwania symulacji, czyli po **133 s** od momentu uruchomienia oddymiania.



Wykres pomiaru transmitancji w warunkach letnich. Czas wypływu dymu przez drzwi wejściowe klatki schodowej wyniósł 1058 s trwania symulacji, czyli **698 s** od momentu uruchomienia oddymiania.



## 7.0 WNIOSKI

Czas usunięcia dymu zależny jest w istotny sposób od warunków atmosferycznych. Skuteczność systemu usuwania dymu odzwierciedlona w czasie niezbędnym do jej oczyszczenia wzrasta ze spadkiem temperatury zewnętrznej względem temperatury panującej w jej wnętrzu. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzić można, że projektowany system, którego celem jest usuwanie dymu z przestrzeni przedmiotowych klatek schodowych, zapewnia oczyszczenie ich z dymu poniżej 15 minut w przypadku izotermicznych i letnich warunków temperaturowych. W przypadku zimowych warunków temperaturowych dym wypływał w czasie krótszym niż 3 minuty.

**W przypadku warunków letnich ze względu na niekorzystne zewnętrzne warunki temperaturowe oraz niską temperaturę dymu pożaru testowego należy spodziewać się odwróconego efektu kominowego, czyli opadania warstwy dymu, a w efekcie końcowym usuwania go przez otwory napowietrzające zlokalizowane na parterze. Dlatego też, wynik liniowego pomiaru transmitancji światła na wysokości 2,0 m powyżej spocznika ostatniej kondygnacji dla tego przypadku nie będzie miarodajny, a całkowity czas oczyszczania klatki z dymu będzie inny. Dla warunków letnich podany pomiar dotyczy poziomu parteru.**

Klatki schodowe zostały oczyszczone z dymu (czas, w którym osiągnięto 95% transmitancji i kryteria zostały spełnione):

Warunki klimatyczne	Oczyszczenie klatki schodowej (od uruchomienia systemu oddymiania)	Oczyszczenie klatki schodowej (od rozpoczęcia symulacji)
izotermiczne	753 s	1113 s
letnie*	698 s	1058 s
zimowe	133 s	493 s

\* wartość dla parteru

Należy zwrócić uwagę na fakt, że przestrzeń klatki schodowej jest w całości wydzielona pożarowo od przestrzeni użytkowych na wyższych poziomach za pomocą ścian i drzwi klasowych z samozamykaczami. Powyższe parametry zmniejszają ryzyko wystąpienia znacznego zadymienia klatki schodowej przy założeniu właściwego zarządzania obiektem oraz obsługą systemów ochrony ppoż.

Uwzględniając typowe dla projektowanego grawitacyjnego systemu usuwania dymu ograniczenia, powszechnie stosowanego w krajowej praktyce projektowej, uznać można, że funkcjonuje ono w sposób wystarczająco skuteczny, działając zgodnie z przewidywaniami, doprowadzając do oczyszczenia przestrzeni klatki schodowej z dymu w czasie zależnym od panujących warunków atmosferycznych.



**Załącznik A – Literatura**

- 1) McGrattan K.B. et al., Fire Dynamics Simulator (Version 6), User's Guide, NIST Publication 1019, 2022.
- 2) McGrattan K.B. et al., Fire Dynamics Simulator (Version 6) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model, NIST Special Publication 1018-1, 2022.
- 3) McGrattan K.B. et al., Fire Dynamics Simulator (Version 6) Technical Reference Guide Volume 2: Verification, NIST Special Publication 1018-2, 2022.
- 4) McGrattan K.B. et al., Fire Dynamics Simulator (Version 6) Technical Reference Guide Volume 3: Validation, NIST Special Publication 1018-3, 2022.
- 5) Forney G.P, User's Guide for Smokeview (Version 6) - A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data, NIST Publication 1017-1, 2022.
- 6) Wytyczne CNBOP-PIB W-0003:2016 Systemy oddymiania klatek schodowych. Wydanie 2, maj 2019.
- 7) PN-76/B-03420 Wentylacja i klimatyzacja – Parametry obliczeniowe powietrza zewnętrznego

