


Nr projektu	CRR.23.57	Egz. ... / ...
Nr rewizji	00	
<p align="center">RAPORT Z KOMPUTEROWEGO MODELOWANIA ODDYMIAANIA KLATKI SCHODOWEJ</p>		
Obiekt:	<p align="center">Klatka schodowa w budynku administracyjnym, działka o nr ewid. 802/1 w rejonie ulic Warszawskiej i Św. Wojciecha w Białymstoku, obr. 0017 Bojary, gmina Białystok</p>	
Temat:	<p align="center">Raport z symulacji CFD grawitacyjnego oddymiania klatki schodowej</p>	
Jednostka opracowująca:		<p align="center">ConsultRisk Sp. z o.o. ul. Pęcicka 21 01-688 Warszawa</p>
Opracował:	inż. Sebastian Michalak	
Sprawdził:	dr hab. inż. Adam Krasuski	
Warszawa, czerwiec 2023 r.		

DRAFT V00

Spis treści

	Strona
Spis tabel	4
1. Wprowadzenie	6
2. Założenia projektowe	7
2.1. Charakterystyka obiektu	7
2.2. Parametry instalacji	9
2.3. Cel analizy	10
2.4. Dokumentacja projektowa	11
2.5. Metoda realizacji	11
2.6. Kryteria oceny	13
3. Założenia do symulacji CFD	14
3.1. Charakterystyka użytego programu CFD	14
3.2. Rodzaj i gęstość siatki obliczeniowej	14
3.3. Model turbulencji	15
3.4. Model spalania	15
3.5. Model promieniowania	16
3.6. Warunki początkowe i brzegowe	17
3.7. Czas symulacji	17
4. Wyniki symulacji CFD	18
4.1. Krzywa mocy pożaru	18
4.2. Transmitancja	18
5. Niepewność programu FDS	29
6. Wyniki analizy	31
7. Podsumowanie i wnioski	32
Bibliografia	33

Spis tabel

1.	Parametry projektowanego systemu oddymiania klatki	9
2.	Właściwości materiałów budowlanych	17
3.	Wartości błędu standardowego oraz systematycznego	30
4.	Niepewność odczytu wartości temperatury	30
5.	Niepewność odczytu stężenia dymu	30
6.	Niepewność odczytu prędkości przepływu	30

DRAFT V00

1. Wprowadzenie

Niniejsze opracowanie stanowi raport z analizy systemu oddymiania klatki schodowej zlokalizowanej w budynku administracyjnym znajdującym się na działce o nr ewid. 802/1 w rejonie ulic Warszawskiej i Św. Wojciecha w Białymstoku.

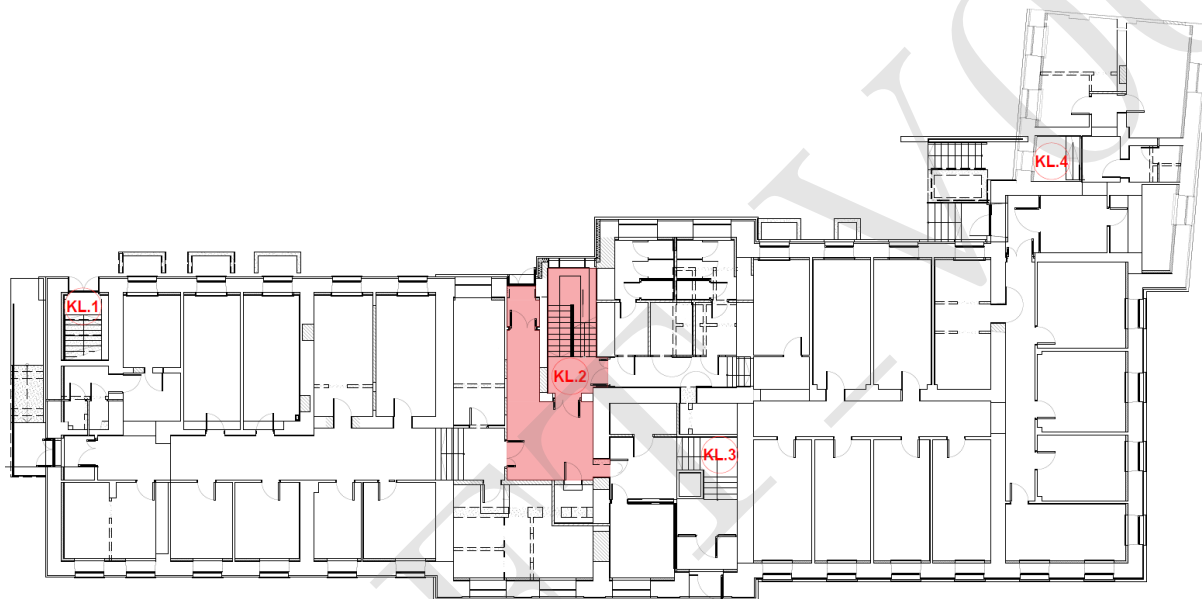
W ramach wykonanych prac przeprowadzono analizę skuteczności działania grawitacyjnej instalacji usuwania dymu i ciepła z przestrzeni klatki schodowej. Oddymianie będzie realizowane grawitacyjnie przez klapę dymową, zamontowaną nad spocznikiem najwyższej kondygnacji. W zaprojektowanym systemie powietrze kompensacyjne będzie dostarczane grawitacyjnie przez troje drzwi napowietrzających w układzie szeregowym zlokalizowanych na parterze klatki schodowej. Parametry instalacji grawitacyjnego usuwania dymu i ciepła przyjęto zgodnie z projektem przebudowy budynku administracyjnego [1] oraz projektem instalacji oddymiania klatki schodowej [2]. Symulacje komputerowe przeprowadzono zgodnie z zasadami wiedzy technicznej w oparciu o wytyczne "Systemy oddymiania klatek schodowych" wydane przez Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpowozarowej im. Józefa Tuliszkowskiego-Państwowy Instytut Badawczy (dalej CNBOP) [3].

Niniejszy raport rozpoczęto od charakterystyki obiektu oraz definicji problemu, które stanowią punkt 2 opracowania. W dalszej kolejności, krótko omówiono metodę realizacji analizy i przedstawiono opracowane scenariusze wraz z kryteriami oceny określającymi skuteczność instalacji oddymiania. W punkcie 3 omówione zostało wykorzystane oprogramowanie, a także przyjęte warunki brzegowe. Punkt 4 przedstawia szczegółowe zestawienie cząstkowych wyników symulacji z podziałem na analizowane scenariusze. Oszacowanie niepewności towarzyszących obliczeniom komputerowym zawarto w punkcie 5. Zestawienie otrzymanych wyników przedstawiono w punkcie 6. Raport zakończono podsumowaniem i wnioskami zawartymi w punkcie 7.

2. Założenia projektowe

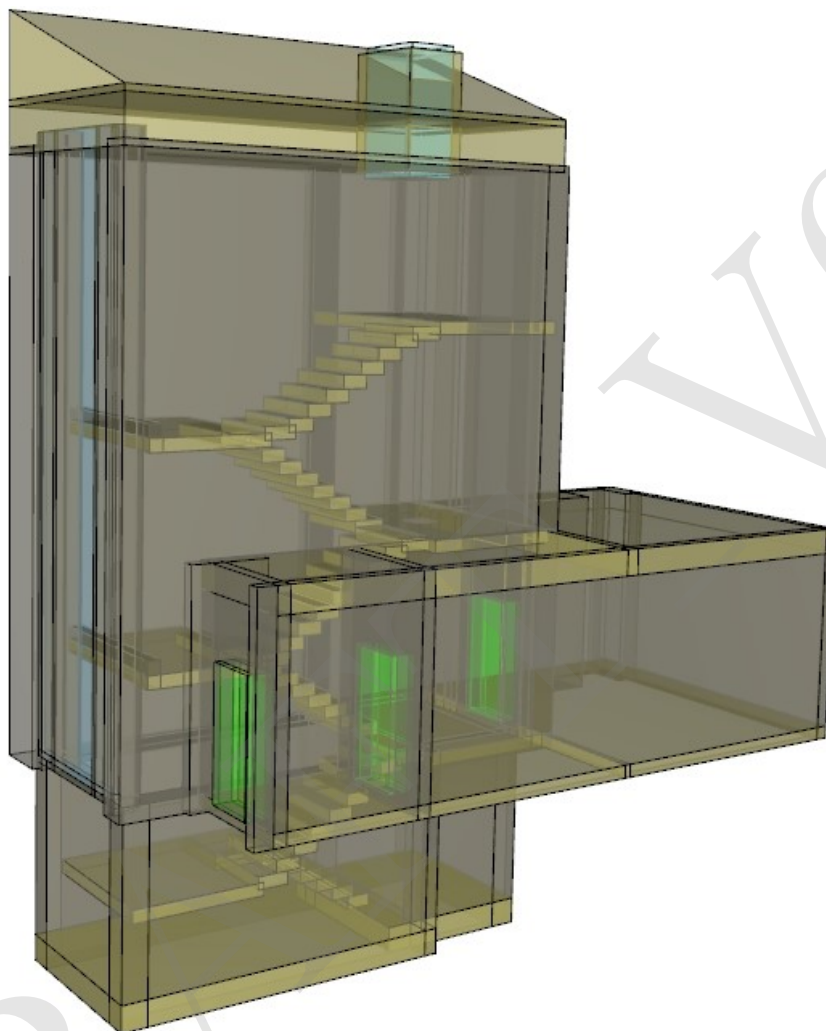
2.1. Charakterystyka obiektu

Przedmiotowa klatka schodowa ze względu na przeznaczenie budynku, w którym się znajduje, stanowi drogę ewakuacyjną ze strefy pożarowej zakwalifikowanej do kategorii ZL III. Analizowana pionowa droga ewakuacji, łączy ze sobą trzy kondygnacje nadziemne oraz jedną kondygnację podziemną. Lokalizację klatki schodowej nr 2 w budynku przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Lokalizacja przedmiotowej klatki schodowej nr 2

Wysokość klatki mierzona pomiędzy najniższym położonym wejściem zlokalizowanym na pierwszej kondygnacji nadziemnej, a sufitem nad najwyższym spocznikiem wynosi ok. 8,94 m. Komputerowy model 3D analizowanej klatki schodowej przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Model klatki schodowej wykorzystany w symulacjach

2.2. Parametry instalacji

Powierzchnia klatki schodowej na parterze budynku wynosi ok. $17,77 \text{ m}^2$. Wskazana w projekcie [2] obliczeniowa powierzchnia klatki schodowej, określona zgodnie z [3] wynosi $15,57 \text{ m}^2$. Wymagana powierzchnia czynna otworów oddymiających niezbędna do skutecznego usuwania dymu powinna stanowić, co najmniej 5% obliczeniowej powierzchni rzutu największego poziomu [3], lecz nie mniej niż 1 m^2 . Wymagana powierzchnia geometryczna grawitacyjnych otworów napowietrzających powinna być nie mniejsza niż 130 % powierzchni geometrycznej zastosowanej klapy dymowej. Parametry projektowanej instalacji usuwania dymu i ciepła, podlegającej weryfikacji symulacjami CFD przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry projektowanego systemu oddymiania klatki

Parametry projektowanego systemu oddymiania klatki	
Wymagana powierzchnia klapy dymowej (A_{cz}) [m^2]	1
Zapewniona pow. czynna klapy dymowej (A_{cz}) [m^2]	1,07
Powierzchnia geometryczna klapy dymowej (A_g) [m^2]	1,43
Wymagana pow. otworu napowietrzającego [m^2]	1,859
Zapewniona pow. otworu napowietrzającego (drzwi zew.) [m^2]	1,863

Skuteczność projektowanej instalacji oddymiania o parametrach przedstawionych w tabeli 1, będzie podlegać weryfikacji z wykorzystaniem symulacji CFD. Zgodnie z wykorzystanymi wytycznymi [3] analiza ta jest konieczna, ponieważ długość dojścia pomiędzy najbardziej oddalonymi drzwiami do granicy powierzchni obliczeniowej klatki schodowej jest większa niż 5 m, a napowietrzanie realizowane jest przez więcej niż dwoje drzwi w układzie szeregowym.

2.3. Cel analizy

Podstawowym celem opracowania jest sprawdzenie efektywności zastosowanego systemu usuwania dymu i ciepła z przestrzeni klatki schodowej. Analizie poddano więc czas, po którym warunki w klatce będą mogły zostać uznane za bezpieczne zgodnie ze stosowaną w Polsce wiedzą techniczną [3].

W wykonanych symulacjach określono czas oddymiania klatki schodowej dla trzech wartości temperatury na zewnątrz jak i wewnątrz budynku, charakterystycznych dla warunków polskich. Odpowiadają one warunkom izotermicznemu (okres wiosny i jesieni), letnim oraz zimowym. Zgodnie z wytycznymi [3], źródło pożaru testowego umieszczono na drugiej kondygnacji nadziemnej budynku. Poniżej przedstawiono opracowane scenariusze pożarowe.

Opracowane scenariusze

Scenariusz 1 – warunki izotermiczne ($+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ na zewnątrz i $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ w środku klatki).

Scenariusz 2 – warunki letnie ($+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ na zewnątrz i $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$ w środku klatki).

Scenariusz 3 – warunki zimowe ($-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ na zewnątrz i $+16\text{ }^{\circ}\text{C}$ w środku klatki).

Temperatury przyjęte w poszczególnych scenariuszach zostały określone na podstawie wytycznych CNBOP-PIB [3], oraz normy PN-EN 12831 *Projektowa temperatura zewnętrzna. Średnia roczna temperatura zewnętrzna. Projektowa temperatura wewnętrzna*. Na rysunku 3 przedstawiono podział obszaru Polski na strefy klimatyczne w okresie letnim oraz zimowym, wraz z zaznaczeniem lokalizacji przedmiotowego budynku.



Rysunek 3. Podział obszaru Polski na strefy klimatyczne

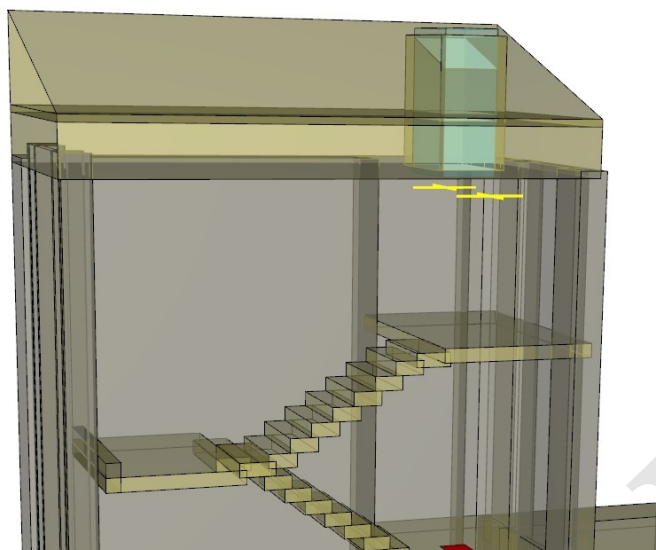
2.4. Dokumentacja projektowa

Stałe parametry przyjęte do analizy wynikają z następującej dokumentacji:

- parametry weryfikowanego systemu oddymiania zostały przyjęte na podstawie projektu przebudowy budynku administracyjnego, autor mgr inż. arch. Tomasz Jacyniewicz, mgr inż. arch. Kamila Grzegorzczak, marzec 2023 r [1] oraz projektu instalacji oddymiania klatki schodowej, autor inż. Sebastian Michalak [2];
- sposób przeprowadzania weryfikacji z wykorzystaniem symulacji CFD został przyjęty na podstawie wytycznych CNBOP [3];
- opory aerodynamiczne w modelu, zostały przyjęte zgodnie z domyślnym modelem programu FDS [4];
- parametry początkowe oraz brzegowe (temperatura wewnątrz i na zewnątrz klatki, ciśnienie, wilgotność), zostały przyjęte na podstawie normy PN-EN 12831:2006 [5];
- właściwości fizykochemiczne materiałów budowlanych, zostały przyjęte na podstawie normy PN-EN ISO 6946 [6];

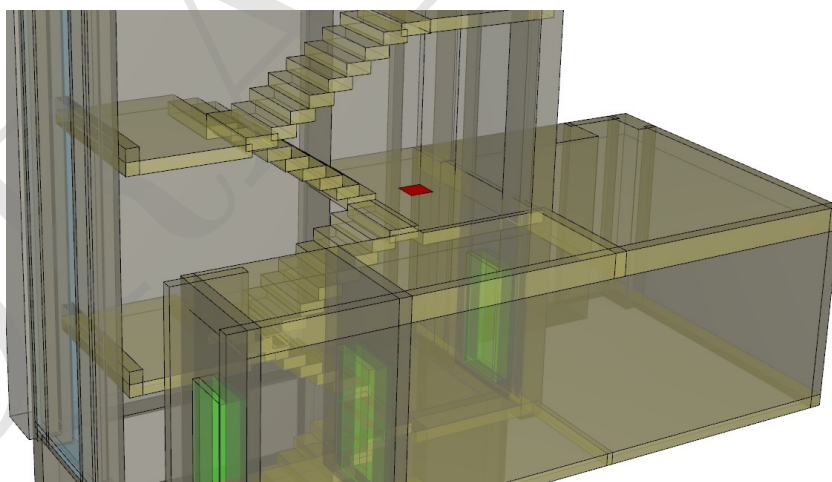
2.5. Metoda realizacji

Metodą realizacji była komputerowa analiza CFD. Parametry determinujące oczyszczenie klatki schodowej z dymu przyjęto według wytycznych CNBOP-PIB [3]. Zgodnie z tymi wytycznymi dokonano pomiaru wartości transmitancji światła powyżej spocznika ostatniej kondygnacji. Wartość krytyczna to 95% mierzona na wysokości 2 m od poziomu tego spocznika. Pomiaru dokonano za pomocą detektora liniowego. Nadajnik od odbiornika czujki oddalony był o 1 m. Rysunek 4 przedstawia umiejscowienie ww. czujki liniowej. Lokalizacja urządzeń pomiarowych była stała we wszystkich scenariuszach.



Rysunek 4. Rozmieszczenie urządzeń pomiarowych (żółte linie)

We wszystkich scenariuszach przez pierwsze 300 sekund symulacji, klatka schodowa była zadymiana. Następnie przez 60 sekund dym rozchodził się po dostępnej przestrzeni budynku. System oddymiania w klatce, zgodnie z metodyką zaproponowaną w wytycznych [3], uruchomiany był w 360 sekundzie symulacji. Od tego momentu mierzono czas oczyszczania klatki schodowej z dymu. Pożar testowy, został przyjęty według wytycznych CNBOP [3]. Jego lokalizację przedstawiono na rysunku 5.



Rysunek 5. Umieszczenie pożaru testowego (czerwone pole) w klatce schodowej. Lokalizacja na drugiej kondygnacji nadziemnej [3]

2.6. Kryteria oceny

Do oceny skuteczności usuwania dymu i ciepła z przestrzeni analizowanej klatki schodowej przyjęto następujące kryteria:

1. Po uruchomieniu instalacji oddymiania, zalegający dym ma przepływać w górę klatki, gdzie następnie zostanie usunięty przez znajdującą się tam klapę dymową.
2. Przestrzeń klatki schodowej uznaje się za oddymioną, jeżeli zmierzona transmitancja na wysokości 2 m od poziomu najwyższego spocznika wynosi 95%. Parametr przyjęty zgodnie z zasadami wiedzy technicznej, zawartej w wytycznych CNBOP [3]. Kryterium to jest ilościowym wyznacznikiem całkowitego usunięcia dymu z klatki schodowej. Dla systemów z nawiewem grawitacyjnym nie określa się maksymalnej długości czasu oczyszczenia.

3. Założenia do symulacji CFD

3.1. Charakterystyka użytego programu CFD

Do przeprowadzenia szczegółowej analizy oraz otrzymania wyników zawartych w niniejszym raporcie, został wykorzystany program *Fire Dynamics Simulator* wersja 6.7.7, który jest narzędziem opracowanym przez amerykański instytut naukowo-badawczy NIST (National Institute of Standards and Technology). Aplikacja wykorzystuje metody obliczeniowe numerycznej mechaniki płynów CFD. Model CFD, zastosowany w programie FDS pozwala badać rozwój pożaru w złożonych geometriach.

CFD opisuje ruch płynu na podstawie rozwiązań układu równań różniczkowych cząstkowych Naviera-Stokesa. Wykorzystują one zasady zachowania masy, pędu i energii. FDS jest narzędziem przeznaczonym do szczegółowej analizy zagrożeń pożarowych i rozwiązywania problemów związanych inżynierią bezpieczeństwa pożarowego. Zapewnia tym samym możliwość poznania dynamiki zjawiska pożaru oraz zachodzących tam procesów spalania. Program ten, w zakresie zagadnień związanych z bezpieczeństwem pożarowym, można stosować do modelowania transportu ciepła i produktów spalania powstałych na skutek pożaru, wymiany ciepła poprzez promieniowanie i konwekcję, pirolizy, rozprzestrzeniania się płomieni oraz rozwoju pożaru, aktywacji tryskaczy oraz czujek dymu i ciepła, czy też oddziaływania kropli wody na płomień [4].

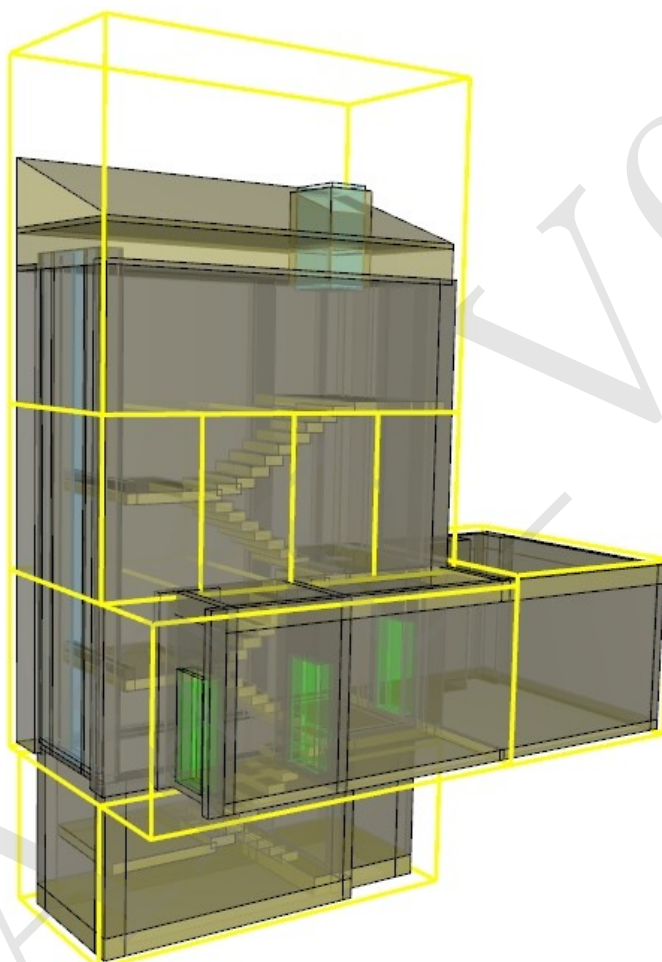
Program FDS wykorzystuje metodę dużych wirów (Large Eddy Simulations – LES) oraz, po wprowadzeniu odpowiednio gęstej siatki obliczeniowej, bezpośrednią symulację numeryczną (DNS). Model LES uwzględnia wiry o wielkości porównywalnej z wielkością komórek siatki. Metoda ta w ostatnich latach jest intensywnie rozwijana, ponieważ stanowi kompromis pomiędzy dokładnością odwzorowania dynamiki pożaru, a dostępnymi obecnie możliwościami obliczeniowymi.

3.2. Rodzaj i gęstość siatki obliczeniowej

W symulacjach użyto regularnej siatki sześcienniej. W celu skrócenia czasu obliczeń przy jednoczesnym zachowaniu najwyższej dokładności główną domenę obliczeniową w każdym scenariuszu, podzielono na 8 mniejszych części. Domena obejmująca źródło pożaru składała się z komórek sześciennych o długości boku równej 0,05 m. W pozostałych przestrzeniach zastosowano sieć o długości boku równej 0,1 m. Rozmieszczenie poszczególnych sieci modelu przedstawiono na rysunku 6.

Rozmiar sieci obliczeniowych dobrano w oparciu o:

- Wytyczne Health and Safety Laboratory [7];
- Wytyczne NUREG, publikowane również w instrukcji użytkownika FDS6 User's Guide [4];
- Wytyczne CNBOP-PIB [3].



Rysunek 6. Podział domeny obliczeniowej w symulacjach

3.3. Model turbulencji

W przeprowadzonej symulacji został wykorzystany model Deardorff LES, odpowiedni dla wolnych przepływów dymu i gazów pożarowych pod wpływem termicznych sił wyporu.

3.4. Model spalania

Użyto modelu mixing-controlled. Model ten przyjmuje następujące uproszczenia:

- skład stechiometryczny mieszaniny palnej jest definiowany przez ułamek masowy gazów palnych i produktów spalania oraz powietrza;

- spalanie następuje natychmiast po zmieszaniu;
- spalanie jest jednoetapowe i całkowite;
- procent powstającego tlenku węgla jest stały i wynika z początkowych założeń symulacji, a nie z aktualnych warunków spalania.

3.5. Model promieniowania

Równanie transportu promieniowania dla gazu szarego, jest rozwiązywane metodą objętości skończonych (FVM – Finite Volume Method). Metoda ta dzieli całe widmo promieniowania na kilka przedziałów częstości (typowo 6) i korzysta w nich z całkowitej postaci równań transportu promieniowania. Przedziały te dobrane są tak, by pokrywały się z pasmami widma substancji występujących w układzie.

Zakłada się, że promieniowanie rozchodzi się jednakowo we wszystkich kierunkach. Powoduje to, że źródło promieniowania można otoczyć hipotetyczną sferą, przez którą przechodzi strumień energii promieniowania. Wielkością charakteryzującą strumień, jest natężenie tego promieniowania w sferze. Dyskretyzacja natężenia promieniowania rozpiętego na sferze, jest przeprowadzona za pomocą metody objętości skończonych przy użyciu kątów bryłowych.

W przypadku symulacji FDS, przestrzeń jest podzielona na prostopadłościenną komórkę (zamiast sferycznych). W celu wyznaczenia intensywności promieniowania na ścianach komórki, wektor intensywności jest rzutowany na płaszczyznę prostopadłą do ścian objętości kontrolnej. Dzięki temu, możliwe jest określenie natężenia na ścianach pojedynczej komórki (objętości kontrolnej). Część strumienia mocy pożaru, emitowana w postaci promieniowania jest stała i jest jednym z parametrów symulacji. Przyjęto ułamek promieniowania 30%, zgodnie z wytycznymi CNBOP-PIB [3].

3.6. Warunki początkowe i brzegowe

Właściwości materiałów budowlanych przyjętych w modelu zaprezentowano w tabeli 2. Wartości przyjęto na podstawie normy PN-EN ISO 6946 [6].

Tabela 2. Właściwości materiałów budowlanych

Material	Właściwości materiału		
Żelbet	Gęstość	2500 kg/m ³	
	Współczynnik przewodzenia	1,7 W/(m · K)	[6]
	Ciepło właściwe	0,84 kJ/(kg · K)	
Błoczki betonowe	Gęstość	800 kg/m ³	
	Współczynnik przewodzenia	0,3 W/(m · K)	[6]
	Ciepło właściwe	0,84 kJ/(kg · K)	
Tynk wapienny	Gęstość	1700 kg/m ³	
	Współczynnik przewodzenia	0,7 W/(m · K)	[6]
	Ciepło właściwe	0,84 kJ/(kg · K)	
Płyta gipsowo-kartonowa	Gęstość	1000 kg/m ³	
	Współczynnik przewodzenia	0,3 W/(m · K)	[6]
	Ciepło właściwe	1 kJ/(kg · K)	
Stal	Gęstość	7850 kg/m ³	
	Współczynnik przewodzenia	58 W/(m · K)	[6]
	Ciepło właściwe	0,44 kJ/(kg · K)	
Szkło	Gęstość	2500 kg/m ³	
	Współczynnik przewodzenia	0,8 W/(m · K)	[6]
	Ciepło właściwe	0,84 kJ/(kg · K)	

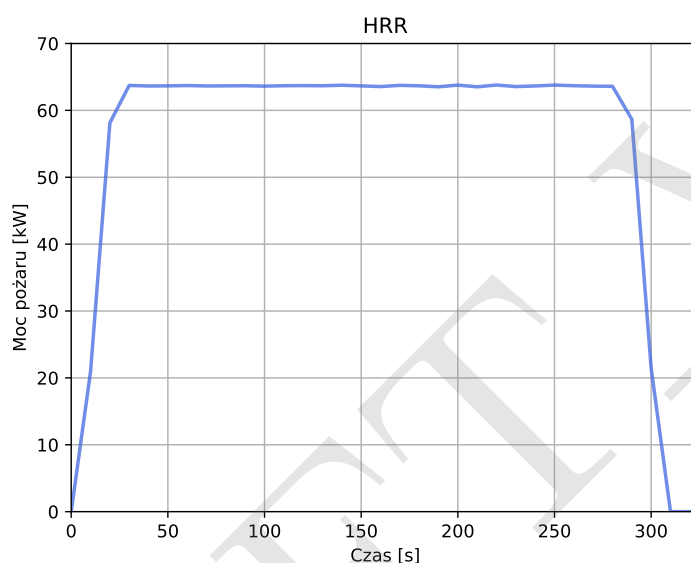
3.7. Czas symulacji

Jako maksymalny czas symulacji przyjęto 1500 sekund. W przypadku wcześniejszego usunięcia dymu zatrzymywano obliczenia. Krok czasowy w symulacjach jest ustalany automatycznie na podstawie liczby CFL, przy użyciu schematu L_{∞} .

4. Wyniki symulacji CFD

4.1. Krzywa mocy pożaru

Pożar testowy dobrano w oparciu o wytyczne CNBOP-PIB [3]. Maksymalna moc pożaru to ok. 64 kW. Rozwój pożaru trwał 15 s, następnie aż do 285 s utrzymywano moc maksymalną, by przez ostatnie 15 s wygasić pożar. Wygenerowana krzywa rozwoju pożaru została przedstawiona na rysunku 7.

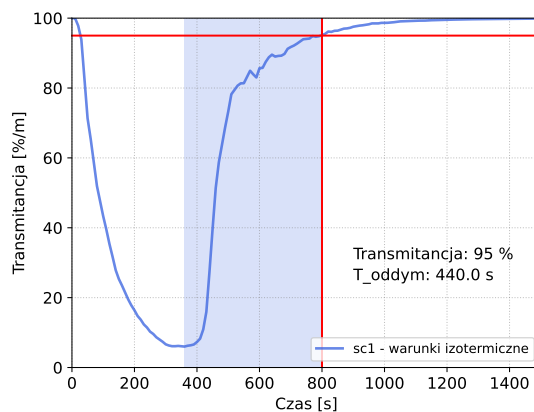


Rysunek 7. Krzywa rozwoju pożaru wykorzystana w symulacjach

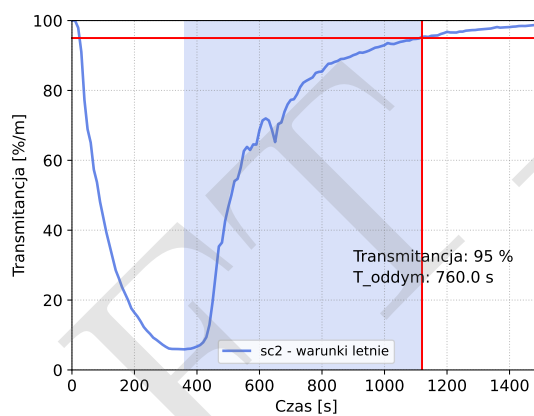
4.2. Transmitancja

Jednym z parametrów, który określał skuteczność oddymiania klatki schodowej była transmitancja światła zmierzona 2 m nad spocznikiem najwyższej kondygnacji. Na rysunkach 8(a) – 8(c) przedstawiono zmianę transmitancji w czasie dla analizowanych scenariuszy. Wartości zostały odczytane z urządzeń pomiarowych umieszczonych w modelach komputerowych (rysunek 4).

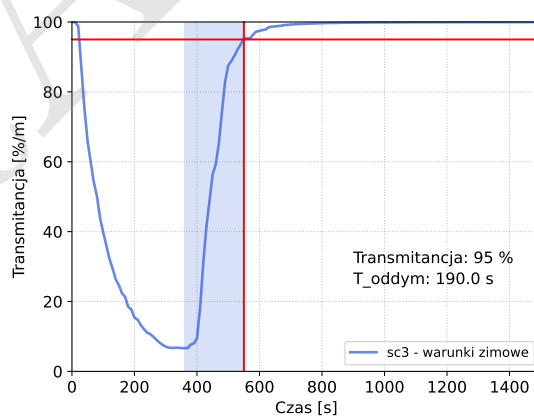
Zaznaczone na rysunkach 8(a) – 8(c) linie koloru czerwonego określają granice pomiaru czasu oddymiania. Pozioma linia wyznacza transmitancję 95%. Czas po jakim urządzenia do usuwania dymu zapewniły zasięg widzialności na tym poziomie wyznacza pionowa czerwona linia. Linia koloru niebieskiego zaznaczono zmianę transmitancji w czasie trwania obliczeń. Obszar koloru niebieskiego przedstawia całkowity czas potrzebny do usunięcia dymu liczony od aktywacji urządzeń oddymiających do osiągnięcia wymaganego poziomu transmitancji.



(a) Scenariusz 1



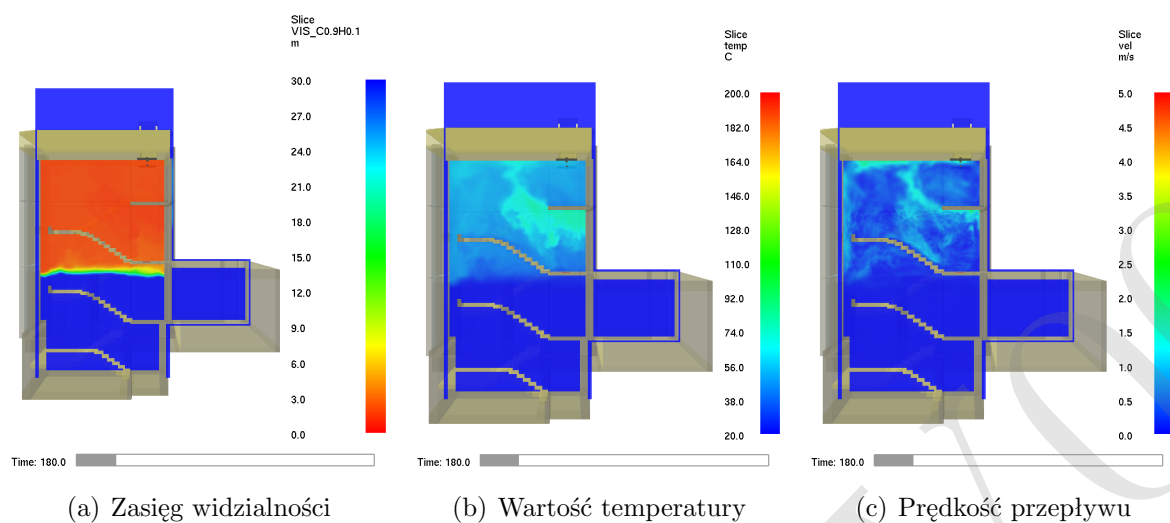
(b) Scenariusz 2



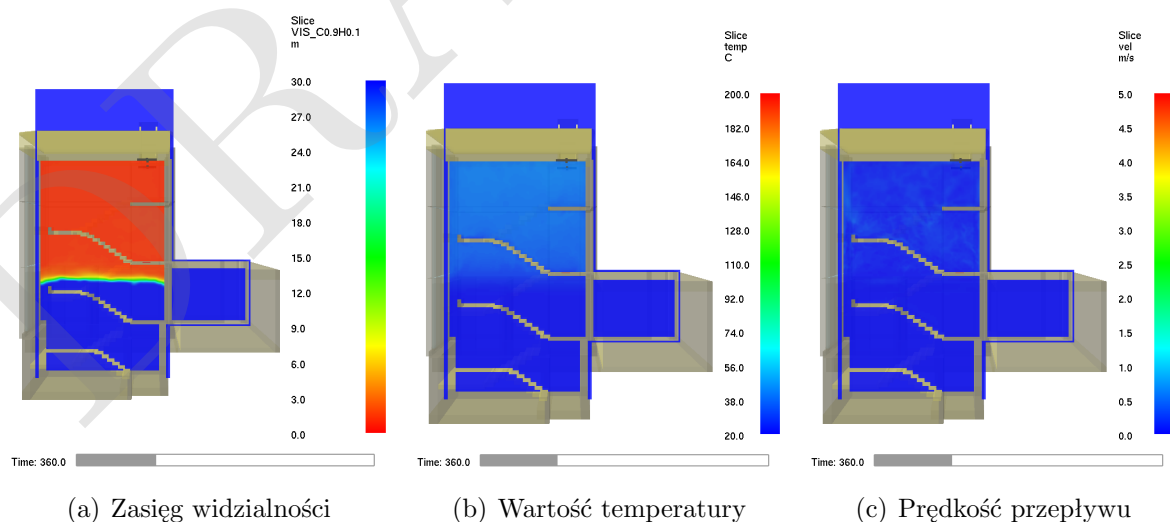
(c) Scenariusz 3

Rysunek 8. Zmiana transmitancji w czasie trwania obliczeń

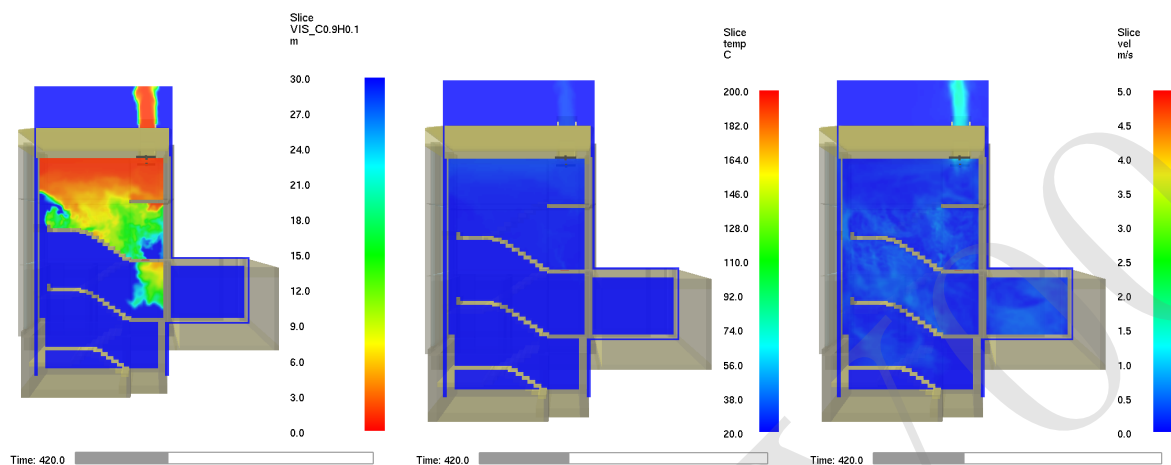
Scenariusz 1 – warunki izotermiczne



Rysunek 9. Warunki w klatce schodowej po 180 s – napływ dymu do klatki



Rysunek 10. Warunki w klatce schodowej po 360 s – uruchomienie systemu oddymiania

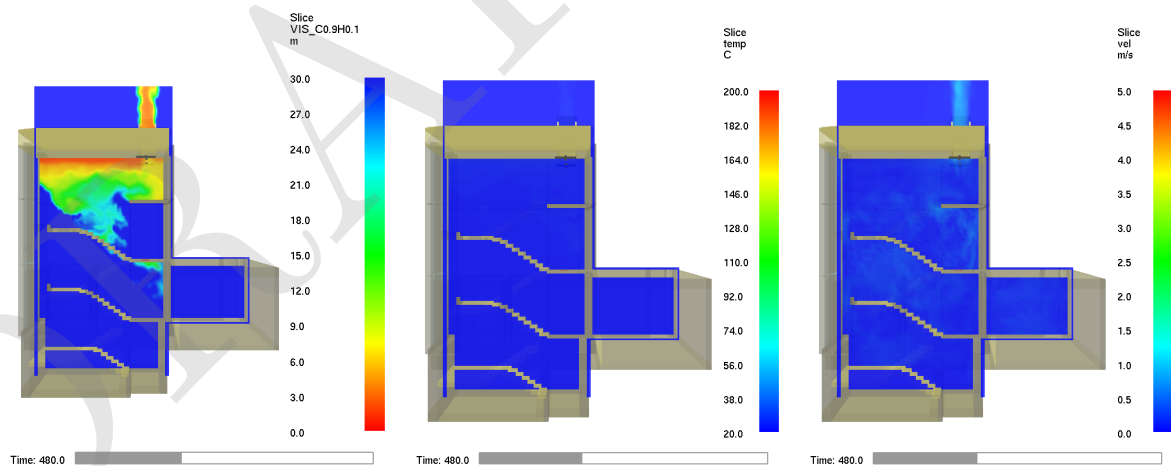


(a) Zasięg widzialności

(b) Wartość temperatury

(c) Prędkość przepływu

Rysunek 11. Warunki w klatce schodowej po 420 s – usuwanie dymu

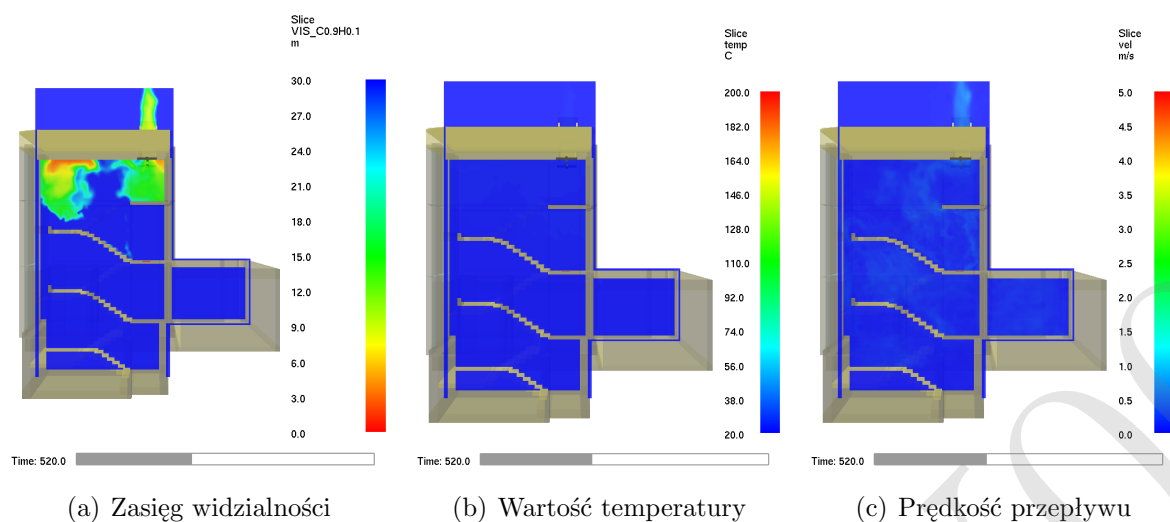


(a) Zasięg widzialności

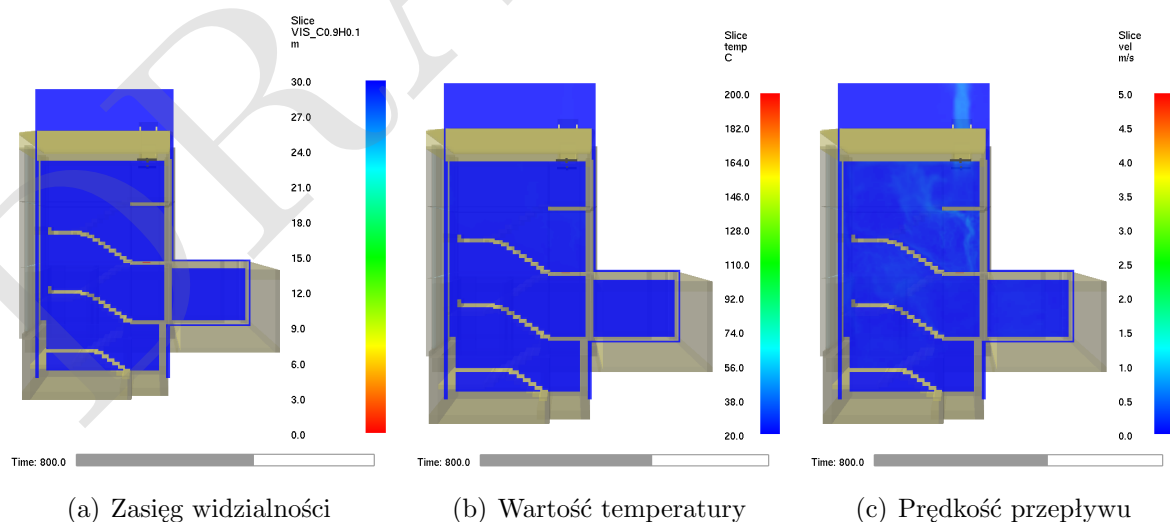
(b) Wartość temperatury

(c) Prędkość przepływu

Rysunek 12. Warunki w klatce schodowej po 480 s – usuwanie dymu

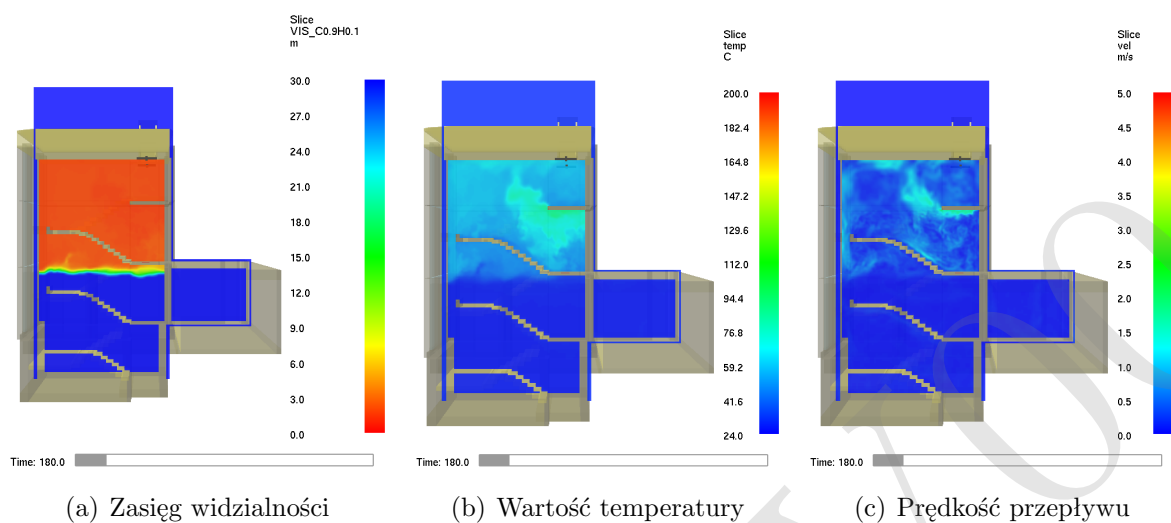


Rysunek 13. Warunki w klatce schodowej po 520 s – usuwanie dymu

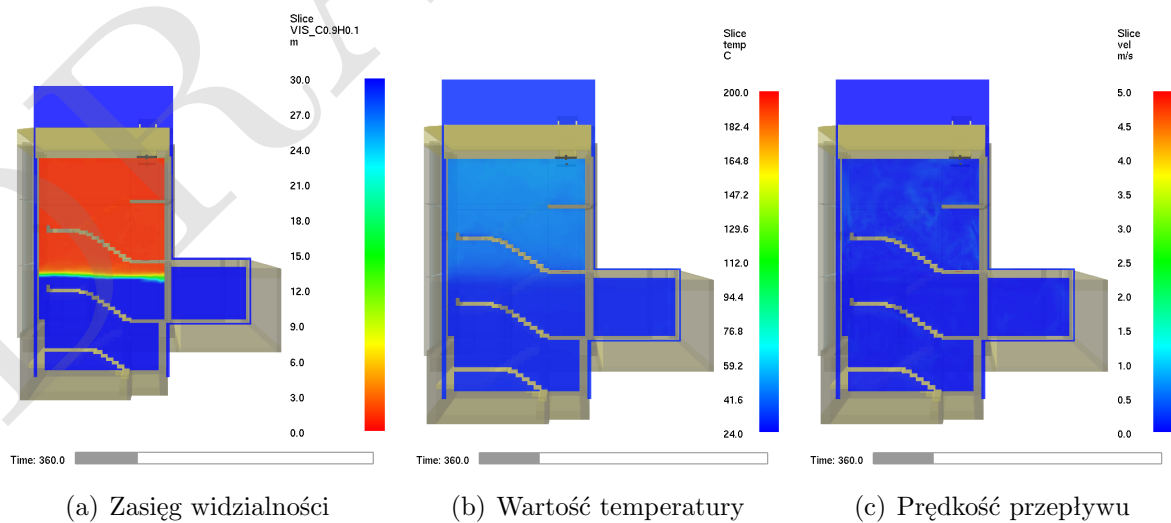


Rysunek 14. Warunki w klatce schodowej po 800 s – dym usunięty z przestrzeni klatki

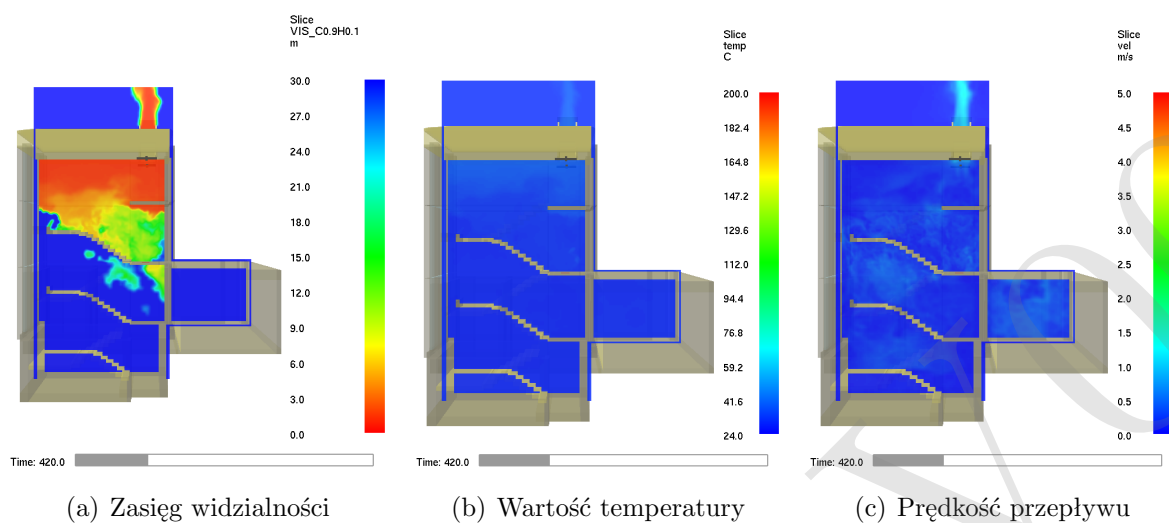
Scenariusz 2 – warunki letnie



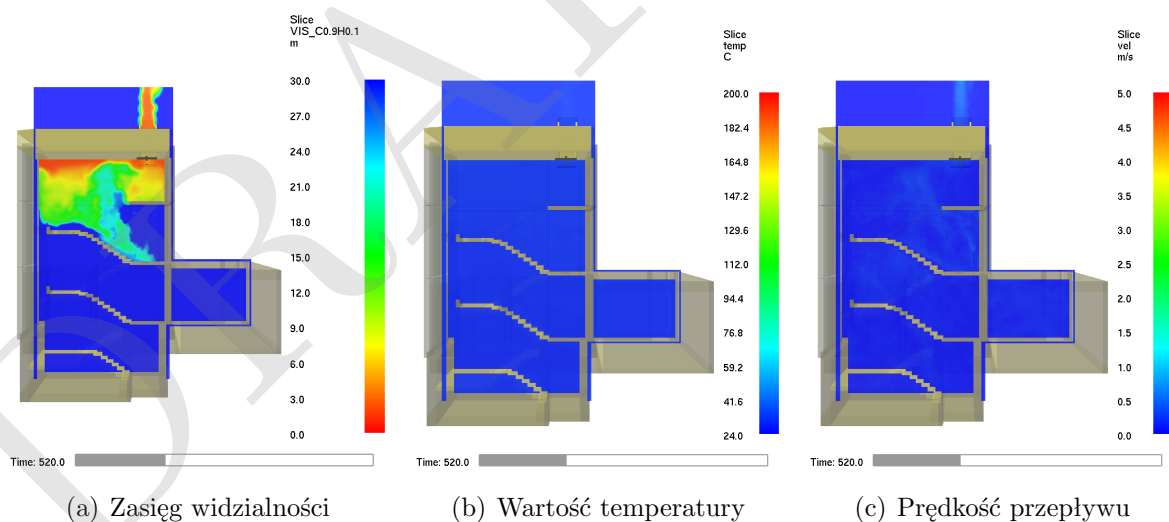
Rysunek 15. Warunki w klatce schodowej po 180 s – napływ dymu do klatki



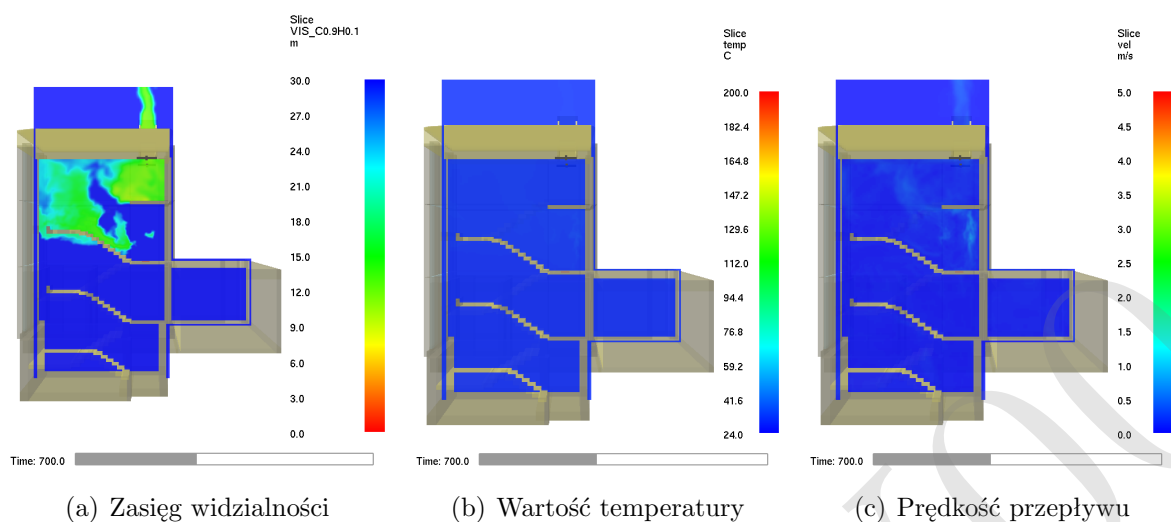
Rysunek 16. Warunki w klatce schodowej po 360 s – uruchomienie systemu oddymiania



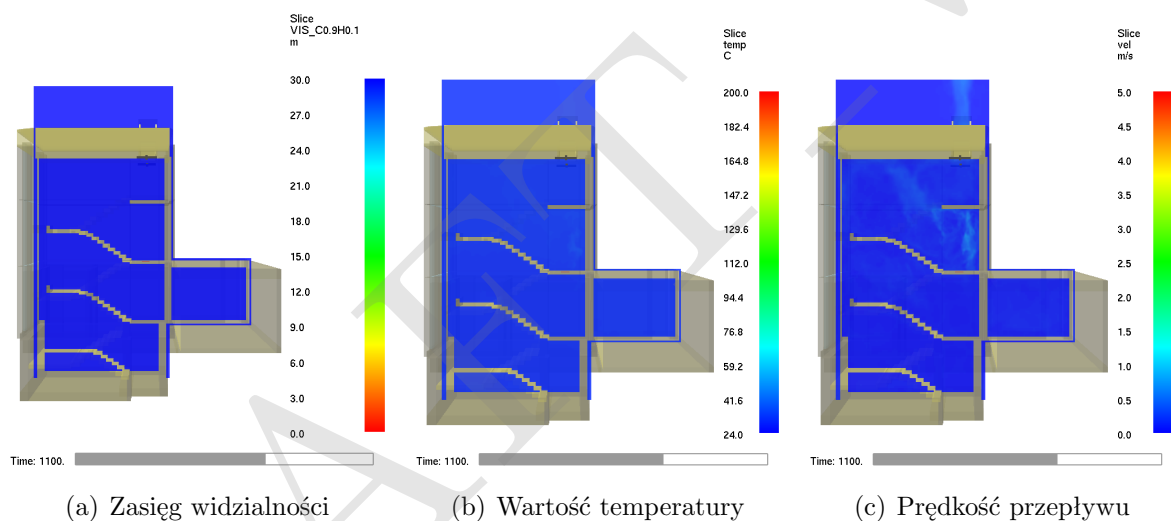
Rysunek 17. Warunki w klatce schodowej po 420 s – usuwanie dymu



Rysunek 18. Warunki w klatce schodowej po 520 s – usuwanie dymu

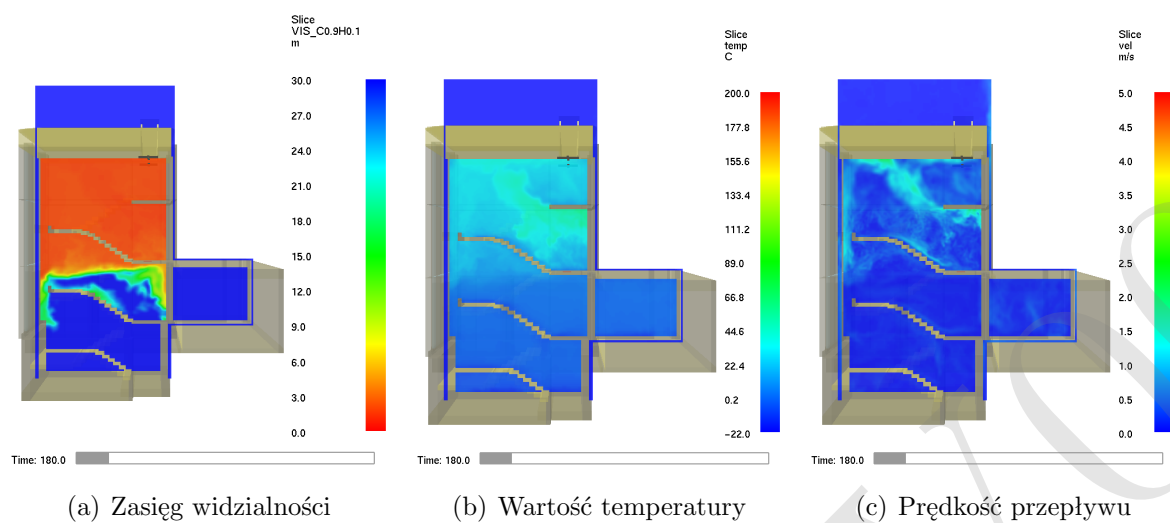


Rysunek 19. Warunki w klatce schodowej po 700 s – usuwanie dymu

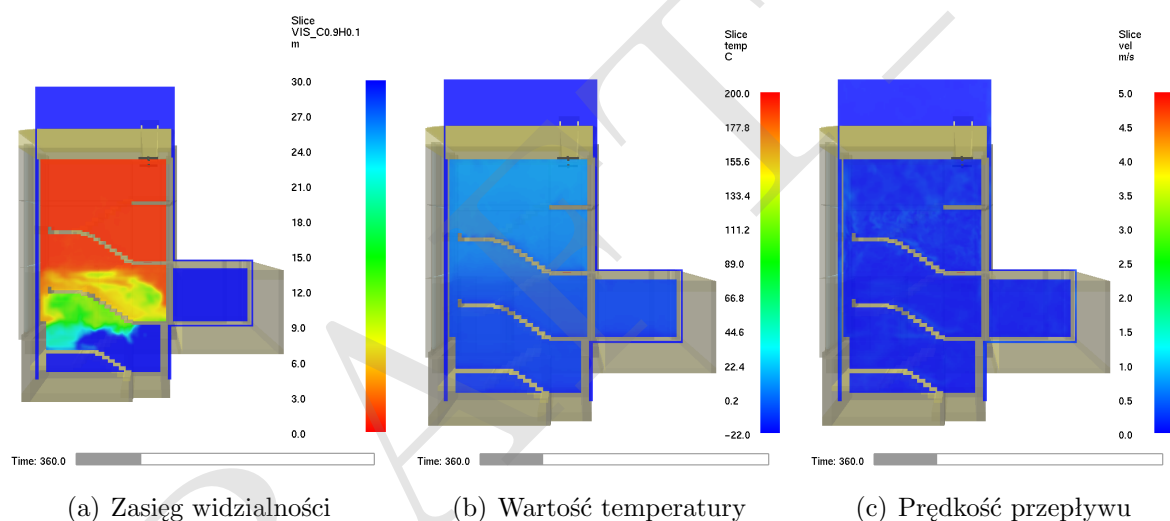


Rysunek 20. Warunki w klatce schodowej po 1100 s – dym usunięty z przestrzeni klatki

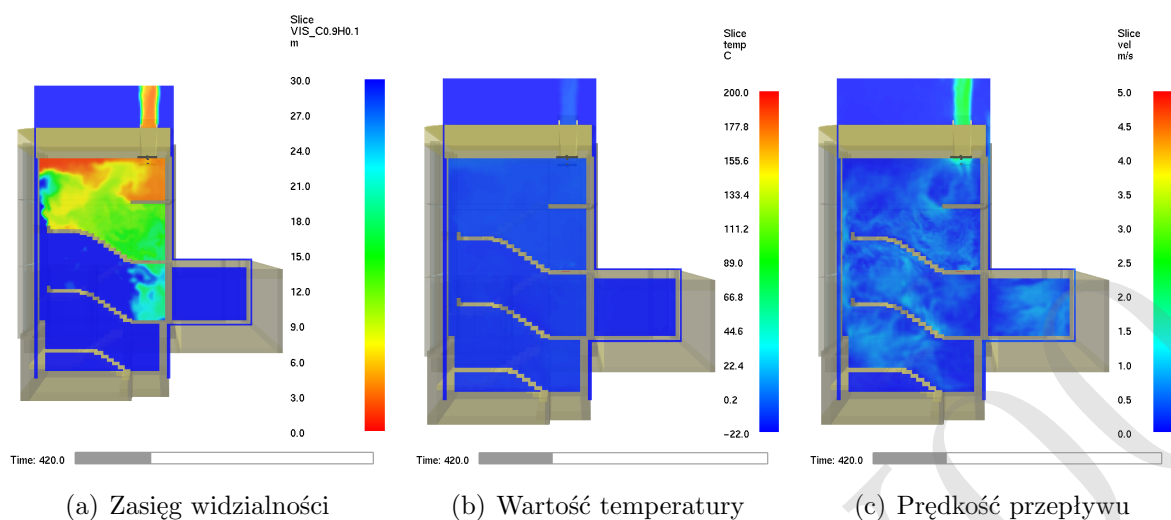
Scenariusz 3 – warunki zimowe



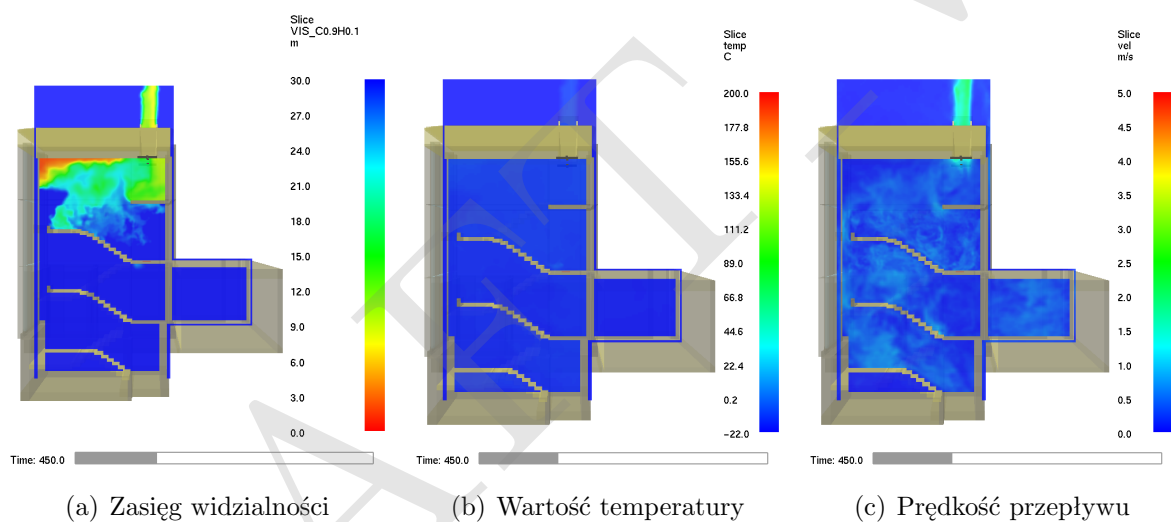
Rysunek 21. Warunki w klatce schodowej po 180 s – napływ dymu do klatki



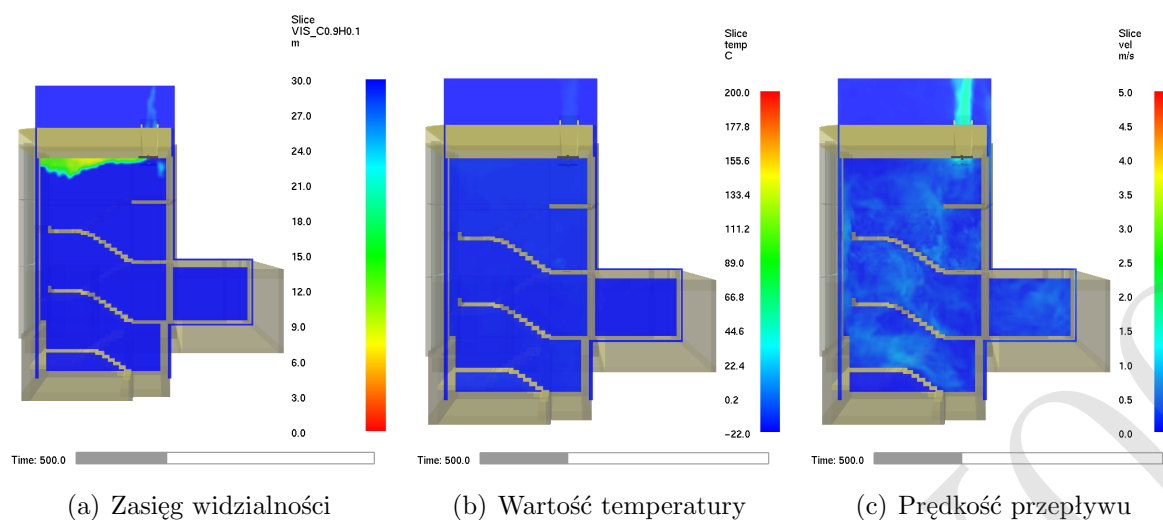
Rysunek 22. Warunki w klatce schodowej po 360 s – uruchomienie systemu oddymiania



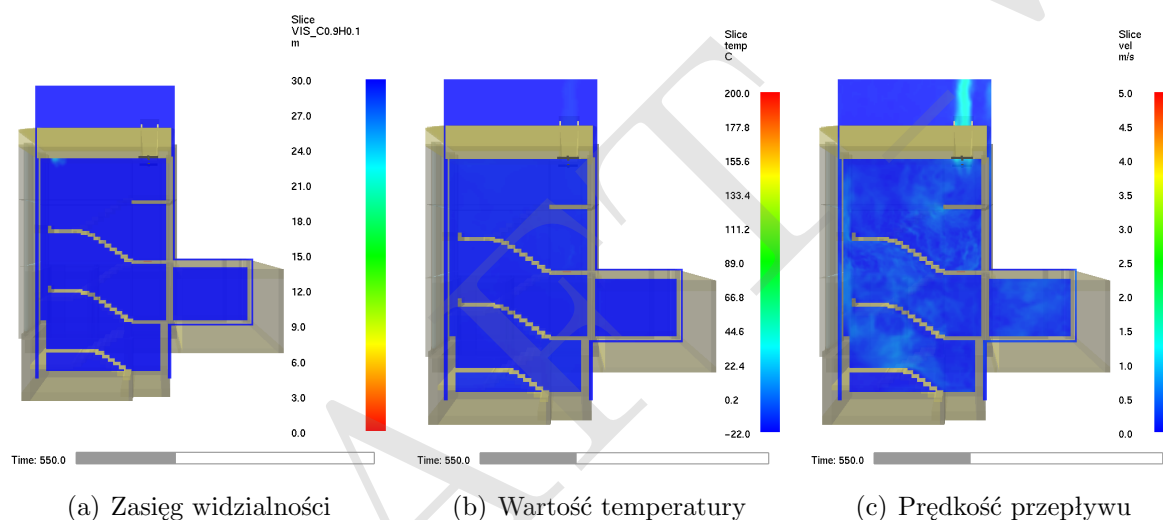
Rysunek 23. Warunki w klatce schodowej po 420 s – usuwanie dymu



Rysunek 24. Warunki w klatce schodowej po 450 s – usuwanie dymu



Rysunek 25. Warunki w klatce schodowej po 500 s – usuwanie dymu



Rysunek 26. Warunki w klatce schodowej po 550 s – dym usunięty z przestrzeni klatki

5. Niepewność programu FDS

W celu sprawdzenia poprawności wyników policzono prawdopodobieństwo przekroczenia dopuszczalnych warunków granicznych. Do tego celu użyto wskaźników niepewności modelu obliczonych na podstawie przewodnika [8].

Zgodnie z założeniami wartość błędu jest rozkładem normalnym warunkowanym wzrostem wartości mierzonej M :

$$\theta|M \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2) \quad (1)$$

gdzie: μ – wartość oczekiwana (średnia) rozkładu; σ^2 – wariancja.

$$\mu = w_p + \frac{M}{\delta}; \quad \sigma = \tilde{\sigma}_M \frac{M}{\delta} \quad (2)$$

gdzie: w_p – wartość początkowa; δ – błąd systematyczny modelu; $\tilde{\sigma}_M$ – błąd standardowy modelu.

Wówczas prawdopodobieństwo, że wartość odczytana z modelu może być większa niż wartość rzeczywista, obliczane jest następująco [4]:

$$P(w_o > w_r) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{w_r - \mu}{\tilde{\sigma}_M \sqrt{2}}\right) \quad (3)$$

gdzie: $\operatorname{erfc}()$ – uzupełniająca funkcja błędu; w_o – wartość odczytana; w_r – wartość rzeczywista.

Na podstawie [9] w tabeli 3 przyjęto następujące wartości δ i $\tilde{\sigma}_M$ pomocne w szacowaniu błędu.

Zależność między zasięgiem widzialności a gęstością dymu przedstawia wzór:

$$D_m = \frac{C}{S \times K_m} \quad (4)$$

gdzie: C – współczynnik widzialności, bezwymiarowa stała, wynosi 3 dla znaków odbijających światło, 8 dla znaków emitujących światło; S – zasięg widzialności [m]; K_m – masowy współczynnik ekstynkcji [m^2/kg], w przypadku większości paliw równy $8700 m^2/kg$.

Tabela 3. Wartości błędu standardowego oraz systematycznego

Wielkość fizyczna	Jednostka	$\tilde{\sigma}_M$	δ
Temperatura warstwy dymu, Wentylacja mechaniczna	°C	0,15	1,05
Temperatura warstwy dymu, Wentylacja grawitacyjna	°C	0,12	1,07
Temperatura warstwy dymu, Brak wentylacji	°C	0,07	1,06
Stężenie dymu	mg/m ³	1,04	2,59
Prędkość przepływu	m/s	0,11	1,01

Tabela 4. Niepewność odczytu wartości temperatury

w_p	w_r	w_o	$P(w_o > w_r)$
Temperatura warstwy dymu, Wentylacja grawitacyjna [°C]			
15	60	55,2	5%
20	60	55,8	5%
15	120	108,8	5%
20	120	109,4	5%
Temperatura warstwy dymu, Wentylacja mechaniczna [°C]			
15	60	52,9	5%
20	60	53,7	5%
15	120	103,4	5%
20	120	104,2	5%

Tabela 5. Niepewność odczytu stężenia dymu

	w_p	w_r		w_o		$P(w_o > w_r)$	$P(w_o < w_r)$
C	D_S	D_S	S	D_S	S	D_S	S
Gęstość dymu [mg/m ³], Zasięg widzialności [m]							
3	0	0,034	10	0,032	10,47	5%	

Tabela 6. Niepewność odczytu prędkości przepływu

Prędkość przepływu [m/s]			
w_p	w_r	w_o	$P(w_o > w_r)$
0	1	0,68	5%
0	2	1,37	5%
0	5	3,42	5%

6. Wyniki analizy

Scenariusz 1 w warunkach izotermicznych. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że od początku symulacji dym przemieszczał się ku górze, w stronę znajdującej się tam kłapy dymowej. Wygaszenie pożaru nastąpiło po czasie 300 s od początku obliczeń numerycznych. Zgodnie ze stosowanymi zasadami wiedzy technicznej na podstawie wytycznych [3] oddymianie rozpoczęto w 360 s. Od samego początku uruchomienia instalacji usuwania dymu i ciepła, warunki panujące w klatce schodowej szybko się poprawiają, a dym ostatecznie zostaje całkowicie usunięty. W symulacjach określono, że czas jaki jest potrzebny do osiągnięcia poziomu 95% transmitancji nad spocznikiem najwyższej kondygnacji wyniesie 440 sekund.

Scenariusz 2 w warunkach letnich. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że od początku symulacji dym przemieszczał się ku górze, gdzie następnie był usuwany przez znajdującą się tam klapę dymową. Wygaszenie pożaru nastąpiło po czasie 300 s od początku obliczeń numerycznych, a oddymianie rozpoczęto w 360 s. Od samego początku uruchomienia instalacji usuwania dymu i ciepła, warunki panujące w klatce schodowej szybko się poprawiają, a dym ostatecznie zostaje całkowicie usunięty. Nieznacznie większe zadymienie w początkowej fazie oddymiania i dłuższy czas oddymiania w stosunku do scenariusza w warunkach izotermicznych wynika z wyższej temperatury zarówno wewnątrz jak i na zewnątrz klatki schodowej. Skutkowało to mniejszą różnicą temperatur pomiędzy zalegającym dymem, a otaczającym go powietrzem, zmniejszając siłę wyporu oraz prędkość przepływu. W scenariuszu w warunkach letnich określono, że usunięcie dymu do poziomu 95% transmitancji nad spocznikiem najwyższej kondygnacji nastąpi po czasie 760 sekund.

Scenariusz 3 w warunkach zimowych. Stwierdzono, że od początku oddymiania dym przemieszczał się ku górze, gdzie następnie był usuwany przez klapę dymową. Tak jak w poprzednich symulacjach, uruchomienie instalacji usuwania dymu nastąpiło po czasie 360 s, od początku analizy. Szybszy przepływ dymu w przestrzeni klatki schodowej wynika z większej różnicy temperatur pomiędzy zalegającym dymem, a otaczającym go powietrzem, zwiększając siłę wyporu. Po uruchomieniu instalacji usuwania dymu i ciepła, warunki panujące w klatce schodowej szybko się poprawiają, a dym ostatecznie zostaje całkowicie usunięty. W symulacjach określono, że czas jaki jest potrzebny do osiągnięcia poziomu 95% transmitancji nad spocznikiem najwyższej kondygnacji wyniesie 190 sekund.

7. Podsumowanie i wnioski

W oparciu o przeprowadzoną analizę, stwierdza się, że:

1. System grawitacyjnej instalacji usuwania dymu i ciepła z nawiewem grawitacyjnym dla przedmiotowej klatki schodowej spełnia postawione wymagania funkcjonalne - dym jest usuwany.
2. Czas oczyszczania z dymu przestrzeni klatki schodowej zgodnie z kryteriami oceny skuteczności oddymiania według stosowanych zasad wiedzy technicznej na podstawie wytycznych CNBOP [3] wynosił odpowiednio:
 - scenariusz 1 (warunki izotermiczne) – 440 s;
 - scenariusz 2 (warunki letnie) – 760 s;
 - scenariusz 3 (warunki zimowe) – 190 s.Czas ten był liczony od momentu otwarcia klapy dymowej.
3. Po aktywacji oddymiania, dym przepływał w górę klatki, skąd następnie był usuwany, przez zainstalowaną tam klapę oddymiającą.
4. Dym z klatki schodowej jest usuwany niezależnie od wartości temperatury występującej na zewnątrz budynku.
5. Pomimo występowania niezgodności z przyjętym standardem projektowym w zakresie odległości pomiędzy najbardziej oddalonymi drzwiami do granicy powierzchni obliczeniowej klatki schodowej, a także realizacji napowietrzania przez więcej niż dwoje drzwi w układzie szeregowym, dym oraz toksyczne gazy pożarowe są skutecznie usuwane.
6. W analizie niepewności, przedstawionej w punkcie 5 raportu, sprawdzono poprawność wyników uzyskanych z symulacji. Odczytane wartości zawierają się w dopuszczalnej tolerancji programu.

Na tej podstawie stwierdza się, że projektowana klapa dymowa w połączeniu z grawitacyjnym nawiewem kompensacyjnym, zapewnią wymaganą sprawność funkcjonalną, zgodną z zasadami wiedzy technicznej. Dodatkowo, zgodnie z wytycznymi [3] w symulacjach komputerowych system oddymiania był aktywowany dopiero po 360 sekundach od początku obliczeń. W rzeczywistych warunkach będzie to następowało od razu po detekcji dymu, co jeszcze podniesie poziom sprawności przedmiotowej instalacji oddymiania.

Bibliografia

- [1] mgr inż. arch. Tomasz Jacyniewicz, mgr inż. arch. Kamila Grzegorzczuk. Projekt przebudowy budynku administracyjnego na potrzeby zarządu w Białymstoku Centralnego Biura Zwalczania Cyberprzestępczości wraz z budową wiaty samochodowo-rowerowej, marzec 2023 r.
- [2] inż. Sebastian Michalak. Projekt instalacji oddymiania klatki schodowej.
- [3] CNBOP -PIB. *Systemy oddymiania klatek schodowych wydanie 2, 2019.* 2019.
- [4] Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Randall McDermott, Jason Floyd, and Marcos Vanella. *Sixth Edition Fire Dynamics Simulator User 's Guide.* National Institute of Standards and Technology, userguide, 6.7.0 edition, 2018.
- [5] PKN. PN-EN 12831 - Instalacje ogrzewcze w budynkach. Metoda obliczania projektowanego obciążenia cieplnego, 2006.
- [6] PKN. PN-EN ISO 6946. Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania. pages 1–30, 1999.
- [7] Nathalie Gobeau, HS Ledin, and Chris Lea. Guidance for HSE Inspectors: Smoke Movement in Complex Enclosed Spaces: Assessment of Computational Fluid Dynamics. 44(0), 2003.
- [8] Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Randall McDermott, Jason Floyd, Craig Weinschenk, and Kristopher Overholt. *Sixth Edition Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3 : Validation.* 1:1–147, 2015.
- [9] Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Randall McDermott, Jason Floyd, Craig Weinschenk, and Kristopher Overholt. *FDS Technical Reference Guide Volume 2 : Validation.* 2015.