


Nr projektu	CRR.25.174	Egz. ...
Nr rewizji	00	
<p align="center">RAPORT Z ANALIZ KOMPUTEROWYCH</p>		
Obiekt:	<p align="center">Szkoła Podstawowa i Gimnazjum ul. Sumińska 9d, Zwonowice parcela nr 315/17</p>	
Temat:	<p align="center">Raport z symulacji CFD grawitacyjnego oddymiania klatki schodowej</p>	
Jednostka opracowująca:	 <p align="center">ConsultRisk</p>	<p align="center">ConsultRisk Sp. z o.o. ul. Pęcicka 21 01-688 Warszawa</p>
Opracował:	<p align="center">inż. Krzysztof Mielcarz</p>	
Sprawdził:	<p align="center">dr hab. inż. Adam Krasuski</p>	
<p align="center">Warszawa, grudzień 2025 r.</p>		

DRAFT V00

Spis treści

	Strona
Spis tabel	4
1. Wprowadzenie	6
2. Podstawy opracowania	7
3. Założenia projektowe	8
3.1. Charakterystyka obiektu	8
3.2. Parametry instalacji	9
3.3. Cel analizy	9
3.4. Dokumentacja projektowa	10
3.5. Metoda realizacji	11
3.6. Kryteria oceny	12
4. Założenia do symulacji CFD	13
4.1. Charakterystyka użytego programu CFD	13
4.2. Rodzaj i gęstość siatki obliczeniowej	13
4.3. Model turbulencji	13
4.4. Model spalania	14
4.5. Model promieniowania	14
4.6. Warunki początkowe i brzegowe	15
4.7. Czas symulacji	16
5. Wyniki symulacji CFD	17
5.1. Krzywa mocy pożaru	17
5.2. Transmitancja	17
6. Niepewność programu FDS	28
7. Wyniki analizy	30
8. Podsumowanie i wnioski	31

Spis tabel

1.	Parametry projektowanego systemu oddymiania klatki schodowej	9
2.	Właściwości materiałów budowlanych	15
3.	Wartości błędu standardowego oraz systematycznego	29
4.	Niepewność odczytu wartości temperatury	29
5.	Niepewność odczytu stężenia dymu	29
6.	Niepewność odczytu prędkości przepływu	29

DRAFT V00

1. Wprowadzenie

Niniejsze opracowanie stanowi raport z analizy systemu oddymiania klatki schodowej w budynku Szkoły Podstawowej i Gimnazjum zlokalizowanego w Zwonowicach przy ul. Sumińskiej 9d; na parceli nr 315/17.

W ramach wykonanych prac przeprowadzono analizę skuteczności działania instalacji usuwania dymu i ciepła z przestrzeni klatki schodowej. Oddymianie będzie realizowane przez klapę dymową, zamontowaną nad spocznikiem najwyższej kondygnacji. W zaprojektowanym systemie powietrze kompensacyjne będzie dostarczane mechanicznie przez kratę nawiewną zlokalizowaną na najniższej kondygnacji klatki schodowej. Parametry instalacji usuwania dymu i ciepła przyjęto zgodnie z dokumentacją przekazaną przez Zlecającego. Symulacje komputerowe przeprowadzono zgodnie z zasadami wiedzy technicznej w oparciu o wytyczne *"Systemy oddymiania klatek schodowych"* wydane przez Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpowodziarowej im. Józefa Tuliszkowskiego–Państwowy Instytut Badawczy (dalej CNBOP) [1].

Niniejszy raport rozpoczęto od przedstawienia podstaw opracowania (punkt 2) z wyszczególnieniem wykorzystanej w przeprowadzonych pracach dokumentacji. Charakterystyka obiektu oraz definicja problemu, stanowią punkt 3 opracowania. W dalszej kolejności, krótko omówiono metodę realizacji analizy i przedstawiono opracowane scenariusze wraz z kryteriami oceny określającymi skuteczność instalacji oddymiania. W punkcie 4 omówione zostało wykorzystane oprogramowanie, a także przyjęte warunki brzegowe. Punkt 5 przedstawia szczegółowe zestawienie cząstkowych wyników symulacji z podziałem na analizowane scenariusze. Oszacowanie niepewności towarzyszących obliczeniom komputerowym zawarto w punkcie 6. Zestawienie otrzymanych wyników przedstawiono w punkcie 7. Raport zakończono podsumowaniem i wnioskami zawartymi w punkcie 8.

2. Podstawy opracowania

Analizę przeprowadzono na podstawie następujących norm i aktów prawnych, a także materiałów dostarczonych przez Inwestora:

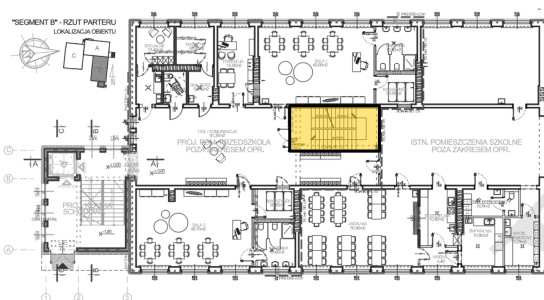
- [1] CNBOP-PIB. Wytyczne CNBOP-PIB W-0003:2016 *Systemy oddymiania klatek schodowych*, Wydanie 2, 05 2019;
- [2] mgr inż. arch. S. Gruczelak, mgr inż. arch. J. Rowińska-Guźda, inż. F. Kolarczyk. Projekt zmian do proj. ukończenia budowy szkoły podstawowej i gimnazjum zlokalizowanego w Zwonowicach przy ul. Sumińskiej 9d; na parceli nr 315/17, 09 2025
- [3] Kevin McGrattan, Simo. Hostikka, Randall McDermott, Jason Floyd, Craig Weinschenk, and Kristopher Overholt. FDS User's Guide Sixth Edition. 2018;
- [4] PKN. PN-EN 12831 - Instalacje ogrzewcze w budynkach. Metoda obliczania projektowanego obciążenia cieplnego, 2006.;
- [5] PKN. PN-EN ISO 6946. Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania. pages 1–30, 2004;
- [6] 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.
- [7] K McGrattan, S. 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;
- [8] K McGrattan, S. Hostikka, Randall McDermott, Jason Floyd, Craig Weinschenk, and Kristopher Overholt. FDS Technical Reference Guide Volume 2 : Validation. 2015;

Jeżeli w raporcie przywołane będą odniesienia do przepisów lub dokumentów, tytuł zostanie zastąpiony numerem w nawiasie kwadratowym [...] zgodnie z powyższym spisem.

3. Założenia projektowe

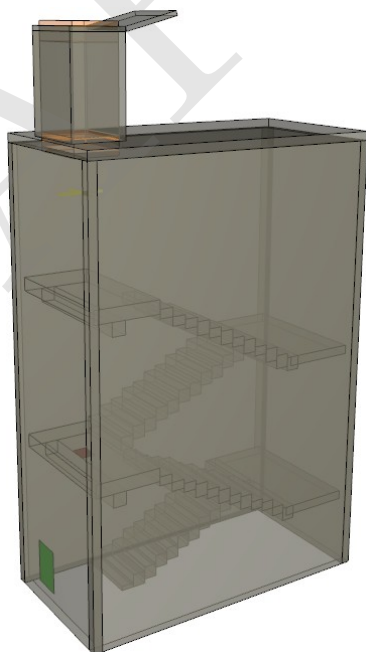
3.1. Charakterystyka obiektu

Analizowana pionowa droga ewakuacji łączy ze sobą dwie kondygnacje nadziemne oraz jedną podziemną. Lokalizację klatki schodowej we wskazanym budynku przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Lokalizacja przedmiotowej klatki schodowej

Wysokość klatki mierzona pomiędzy posadzką kondygnacji podziemnej, a sufitem nad najwyższym spocznikiem wynosi ok. 10,1 m. Komputerowy model 3D analizowanej klatki schodowej przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Model klatki schodowej wykorzystany w symulacjach

3.2. Parametry instalacji

Powierzchnia obliczeniowa klatki schodowej określona zgodnie z wytycznymi CNBOP [1] wynosi ok. 19,5 m². Wymagana powierzchnia czynna otworów oddymiających niezbędna do skutecznego usuwania dymu powinna stanowić, co najmniej 5% powierzchni obliczeniowej tej klatki schodowej, lecz nie mniej niż 1 m². Do kompensacji usuwanego powietrza w klatce schodowej zostanie wykorzystany nawiew mechaniczny o wydajności 12 000 m³/h, z kratą nawiewną zlokalizowaną na najniższej kondygnacji. Parametry projektowanej instalacji usuwania dymu i ciepła, podlegającej weryfikacji symulacjami CFD przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry projektowanego systemu oddymiania klatki schodowej

Parametry projektowanego systemu oddymiania klatki schodowej	
Wymagana powierzchnia czynna oddymiania (A_{cz}) [m ²]	1,00
Zapewniona powierzchnia czynna oddymiania (A_{cz}) [m ²]	1,05
Powierzchnia geometryczna oddymiania (A_g) [m ²]	1,40
Zapewniona wydajność wentylatora napowietrzającego [m ³ /h]	12 000

Skuteczność projektowanej instalacji oddymiania o parametrach przedstawionych w tabeli 1, będzie podlegać weryfikacji z wykorzystaniem symulacji CFD w celu sprawdzenia efektywności usuwania dymu i ciepła.

3.3. 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 [1].

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 izotermicznym (okres wiosny i jesieni), letnim oraz zimowym. Zgodnie z wytycznymi [1], źródło pożaru testowego umieszczono na pierwszej kondygnacji nadziemnej budynku. Poniżej przedstawiono opracowane scenariusze pożarowe.

Opracowane scenariusze

Scenariusz 1 – warunki izotermiczne (+20 °C na zewnątrz i +20 °C wewnątrz klatki).

Scenariusz 2 – warunki letnie (+30 °C na zewnątrz i +24 °C wewnątrz klatki).

Scenariusz 3 – warunki zimowe (-20 °C na zewnątrz i +16 °C wewnątrz klatki).

Temperatury przyjęte w poszczególnych scenariuszach zostały określone na podstawie wytycznych CNBOP-PIB [1], 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

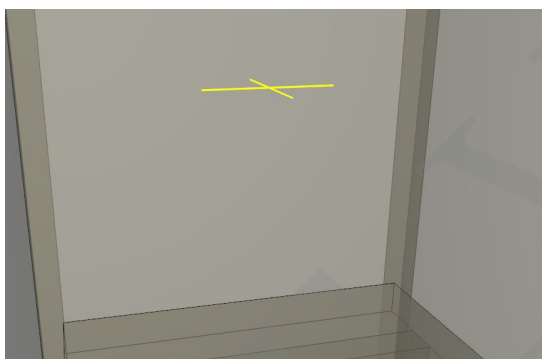
3.4. Dokumentacja projektowa

Stałe parametry przyjęte do analizy wynikają z następującej dokumentacji:

- parametry weryfikowanego systemu oddymiania zostały przyjęte na podstawie dokumentacji przekazanej przez Zlecającego;
- sposób przeprowadzania weryfikacji z wykorzystaniem symulacji CFD został przyjęty na podstawie wytycznych CNBOP [1];
- opory aerodynamiczne w modelu, zostały przyjęte zgodnie z domyślnym modelem programu FDS [3];
- parametry początkowe oraz brzegowe (temperatura wewnątrz i na zewnątrz klatki, ciśnienie, wilgotność), zostały przyjęte na podstawie normy PN-EN 12831:2006 [4];
- właściwości fizykochemiczne materiałów budowlanych, zostały przyjęte na podstawie normy PN-EN ISO 6946 [5];

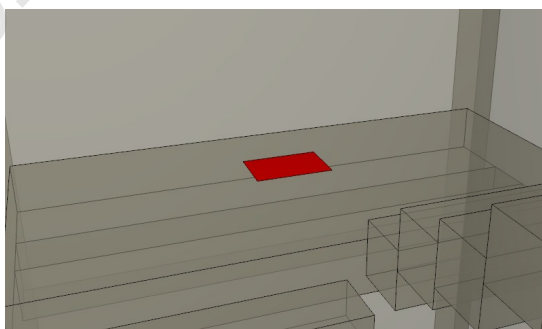
3.5. Metoda realizacji

Metodą realizacji była komputerowa analiza CFD. Parametry determinujące oczyszczenie klatki schodowej z dymu przyjęto według wytycznych CNBOP-PIB [1]. 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 detektorów liniowych. Nadajnik był oddalony o 1 m od odbiornika czujki. Rysunek 4 przedstawia umiejscowienie ww. czujek liniowych. 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 [1], uruchomiany był w 360 sekundzie symulacji. Od tego momentu mierzono czas oczyszczania klatki schodowej z dymu. Pożar testowy, został przyjęty według wytycznych CNBOP [1]. Jego lokalizację przedstawiono na rysunku 5.



Rysunek 5. Umiejscowienie pożaru testowego (czerwone pole) w klatce schodowej. Lokalizacja na pierwszej kondygnacji nadziemnej [1]

3.6. 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 został zgodnie z zasadami wiedzy technicznej, zawartej w wytycznych CNBOP [1]. Kryterium to jest ilościowym wyznacznikiem całkowitego usunięcia dymu z klatki schodowej. Dla systemów z nawiewem grawitacyjnym nie określa się maksymalnej długości czasu oczyszczenia.
3. Czas oddymiania klatki schodowej (t_{odd}) nie powinien być dłuższy niż wynik iloczynu tempa oddymiania oraz różnicy wysokości punktu pomiarowego w klatce schodowej i źródła pożaru. Przyjmuje się tempo oddymiania jako 18 s na 1 m wysokości. W związku z powyższym maksymalny czas oddymiania klatki schodowej nie powinien być dłuższy niż 100,8 s.

4. Założenia do symulacji CFD

4.1. Charakterystyka użytego programu CFD

Do przeprowadzenia analizy użyto programu *Fire Dynamics Simulator* w wersji 6.9.1 wydanego w kwietniu 2024 r. Program FDS został opracowany przez amerykański instytut naukowo-badawczy NIST (National Institute of Standards and Technology) i jest narzędziem przeznaczonym m.in. do modelowania pożarów. Program pozwala analizować transport ciepła i produktów spalania powstałych na skutek pożaru, pirolizy, wymiany ciepła poprzez promieniowanie oraz konwekcję. Wykorzystuje metody numerycznej mechaniki płynów (ang. Computational Fluid Dynamics, CFD) rozwiązując numerycznie postać równań Naviera-Stokesa. Modelowanie obejmuje przepływy o relatywnie niskich prędkościach (do 0,3 liczby Macha - 100 m/s) oraz płyny nieściśliwe, tj. gazy, dla których można pominąć zmiany gęstości przy małych prędkościach przepływu. W programie FDS możliwe jest modelowanie turbulencji zarówno przy użyciu metody DNS (ang. Direct Numerical Simulation), jak również techniki LES (ang. Large Eddy Simulation). Metoda DNS nie jest wykorzystywana do zastosowań inżynierskich z uwagi na konieczność zastosowania dużych mocy obliczeniowych. Najczęściej stosowana metoda LES zakłada, że największe skale przepływu (wiry) są wyliczane bezpośrednio z równań transportu. Niewielkie ruchy wirowe są modelowane z dużym przybliżeniem lub pomijane.

4.2. Rodzaj i gęstość siatki obliczeniowej

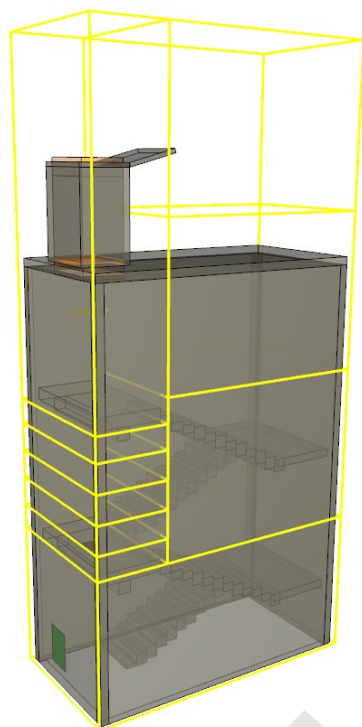
W symulacjach użyto regularnej siatki sześcienniej. W celu skrócenia czasu obliczeń przy jednoczesnym zachowaniu najwyższej dokładności główną domenę obliczeniową w każdym scenariuszu, podzielono na 10 mniejszych części. Domena obejmująca źródło pożaru składała się z komórek sześciennych o długości boku 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 [6];
- Wytyczne NUREG, publikowane również w instrukcji użytkownika FDS6 User's Guide [3];
- Wytyczne CNBOP-PIB [1].

4.3. Model turbulencji

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



Rysunek 6. Podział domeny obliczeniowej w symulacjach

4.4. 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.

4.5. 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 prostopadłościenne komórki (zamiast sferycznych). W celu wyznaczenia intensywności promieniowania na ścianach komórki, wektor intensywności jest rzutowany na płaszczyzny prostopadłe 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 [1].

4.6. Warunki początkowe i brzegowe

Właściwości materiałów budowlanych przyjętych w modelu zaprezentowano w tabeli 2. Wartości przyjęto na podstawie normy PN-EN ISO 6946 [5].

Tabela 2. Właściwości materiałów budowlanych

Material	Właściwości materiału		Źródło
Żelbet	Gęstość	2500 kg/m^3	[5]
	Współczynnik przewodzenia	$1,7 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$	
	Ciepło właściwe	$0,84 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$	
Bloczki betonowe	Gęstość	800 kg/m^3	[5]
	Współczynnik przewodzenia	$0,3 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$	
	Ciepło właściwe	$0,84 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$	
Tynk wapienny	Gęstość	1700 kg/m^3	[5]
	Współczynnik przewodzenia	$0,7 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$	
	Ciepło właściwe	$0,84 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$	
Płyta gipsowo-kartonowa	Gęstość	1000 kg/m^3	[5]
	Współczynnik przewodzenia	$0,3 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$	
	Ciepło właściwe	$1 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$	
Stal	Gęstość	7850 kg/m^3	[5]
	Współczynnik przewodzenia	$58 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$	
	Ciepło właściwe	$0,44 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$	
Szkło	Gęstość	2500 kg/m^3	[5]
	Współczynnik przewodzenia	$0,8 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$	
	Ciepło właściwe	$0,84 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$	

4.7. Czas symulacji

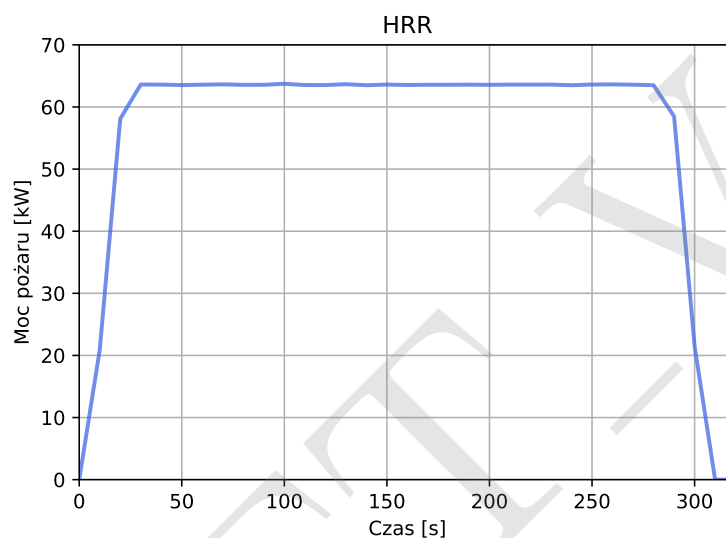
Jako maksymalny czas symulacji przyjęto 1200 sekund. W przypadku wcześniejszego usunięcia dymu zatrzymywano obliczenia. Krok czasowy w symulacjach jest ustalany automatycznie na podstawie liczby CFL, przy użyciu schematu L_∞ .

DRAFT V00

5. Wyniki symulacji CFD

5.1. Krzywa mocy pożaru

Pożar testowy dobrano w oparciu o wytyczne CNBOP-PIB [1]. 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.

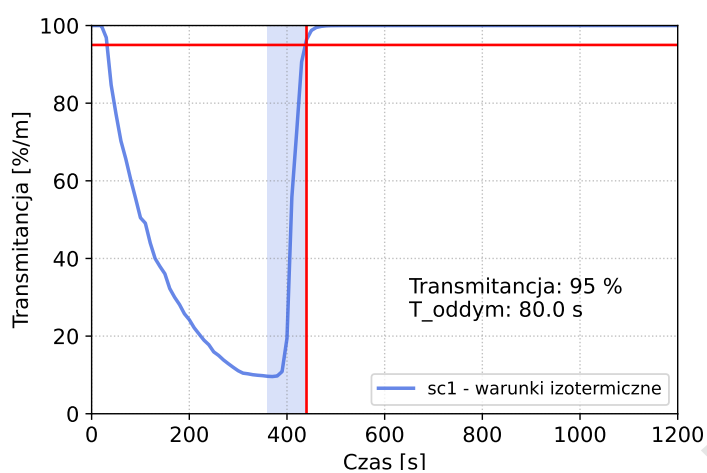


Rysunek 7. Krzywa rozwoju pożaru wykorzystana w symulacjach

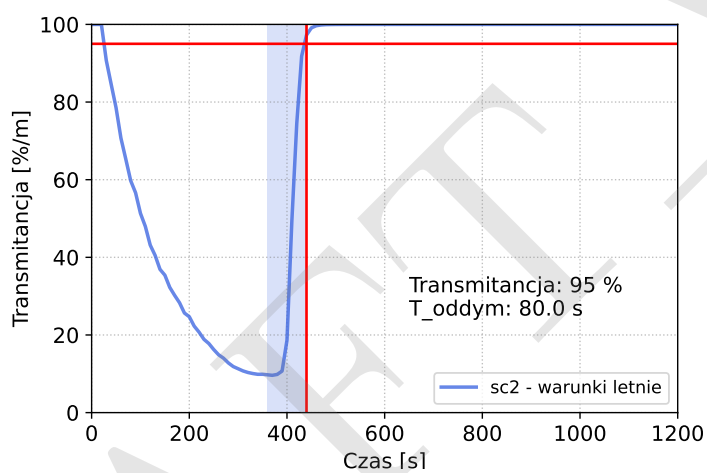
5.2. Transmitancja

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).

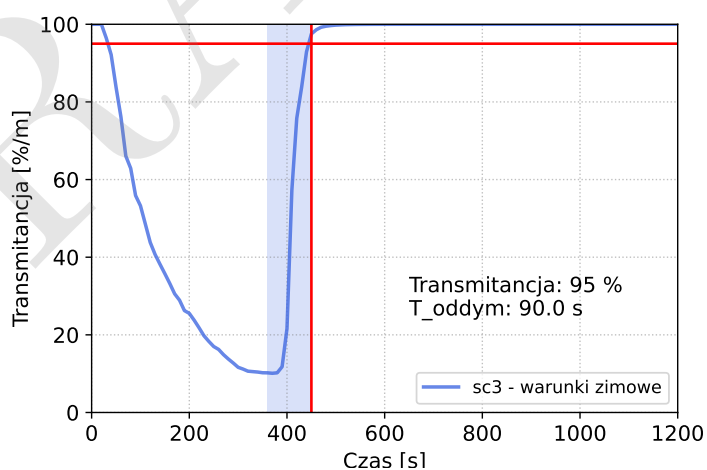
Zaznaczone na rysunkach 8(a) – 8(c) linie koloru czerwonego określają granice pomiaru czasu oddymiania. Pozioma linia wyznacza transmitancję 95%. Czas po jakim urządzenia do usuwania dymu zapewniły zasięg widzialności na tym poziomie wyznacza pionowa czerwona linia. Linia koloru niebieskiego zaznaczono 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



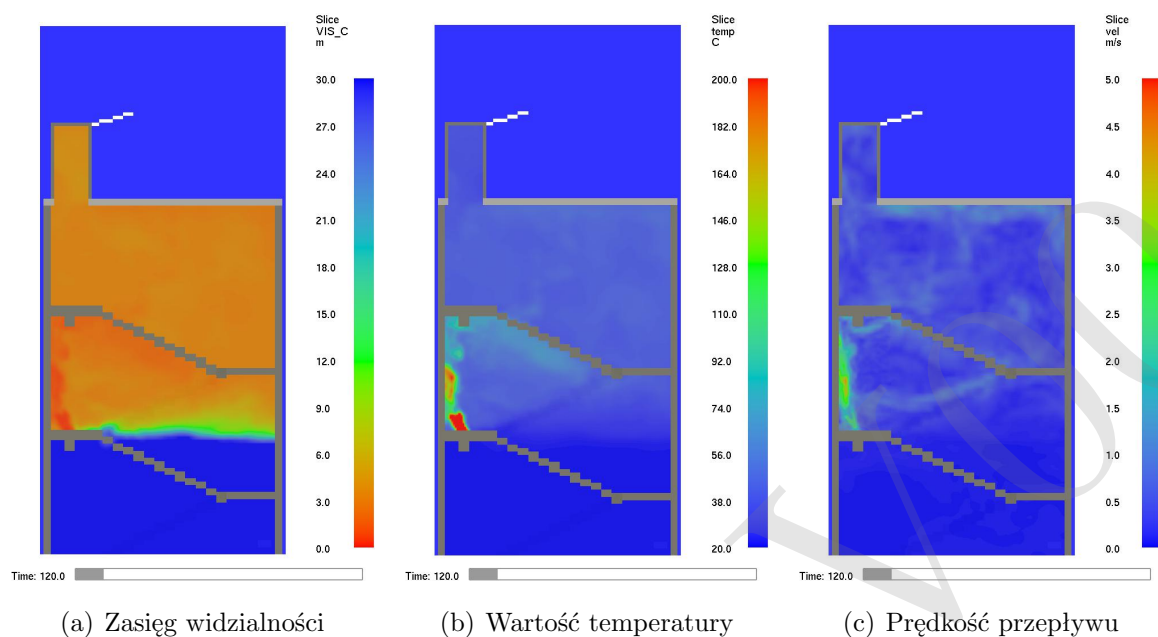
(b) Scenariusz 2



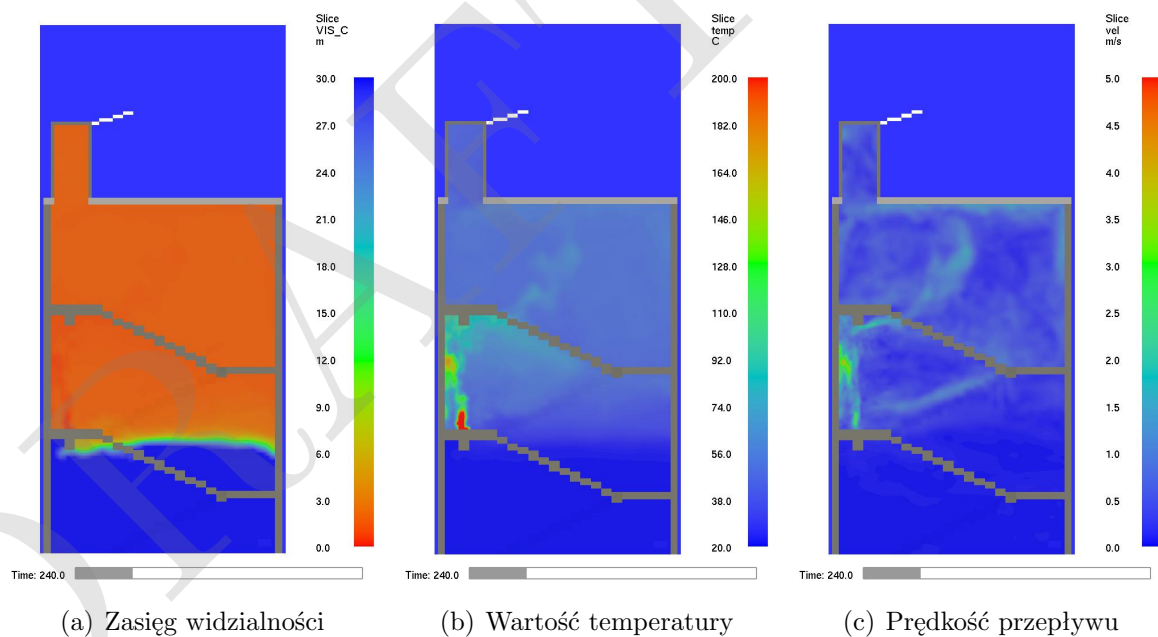
(c) Scenariusz 3

Rysunek 8. Zmiana transmitancji w czasie trwania obliczeń

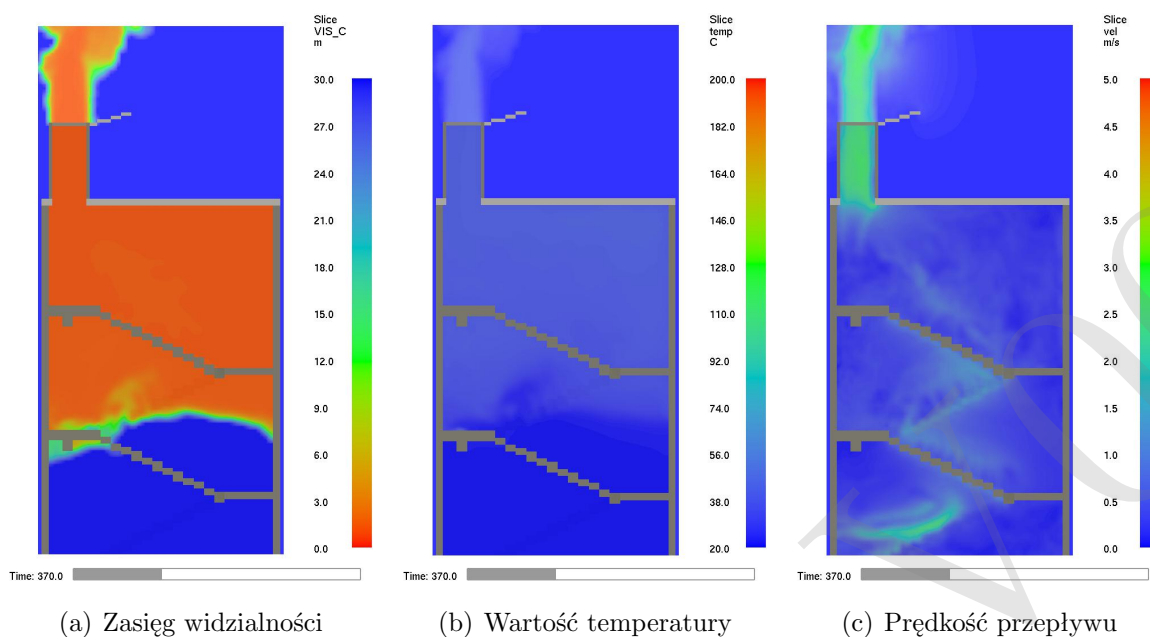
Scenariusz 1 – warunki izotermiczne



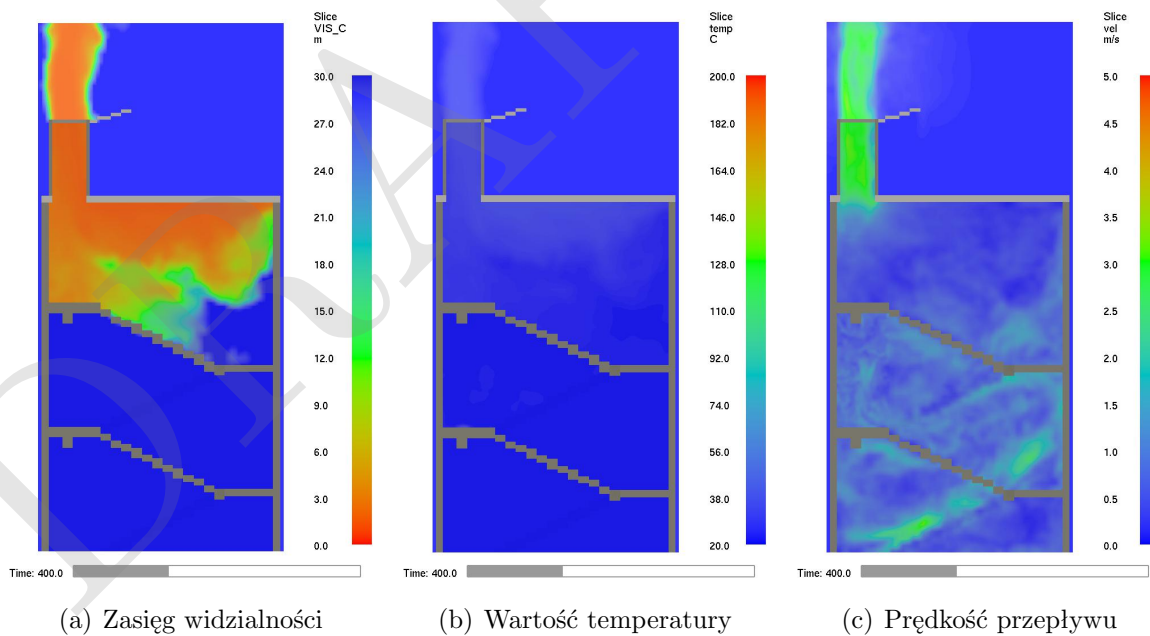
Rysunek 9. Warunki w klatce schodowej po 120 s – napływ dymu do klatki



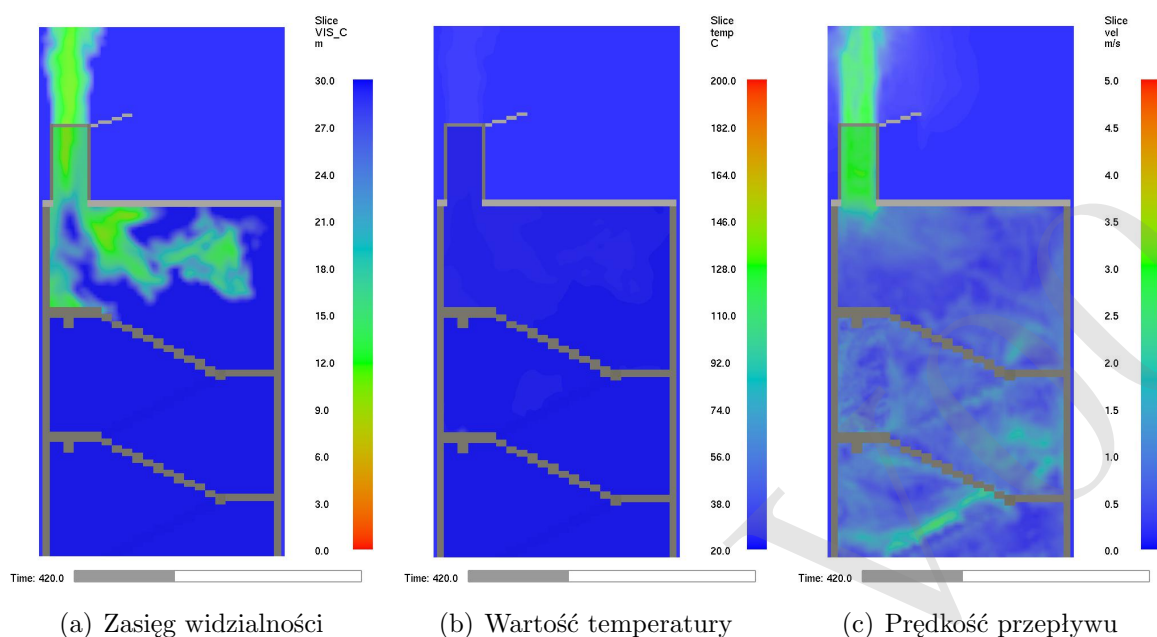
Rysunek 10. Warunki w klatce schodowej po 240 s – napływ dymu do klatki



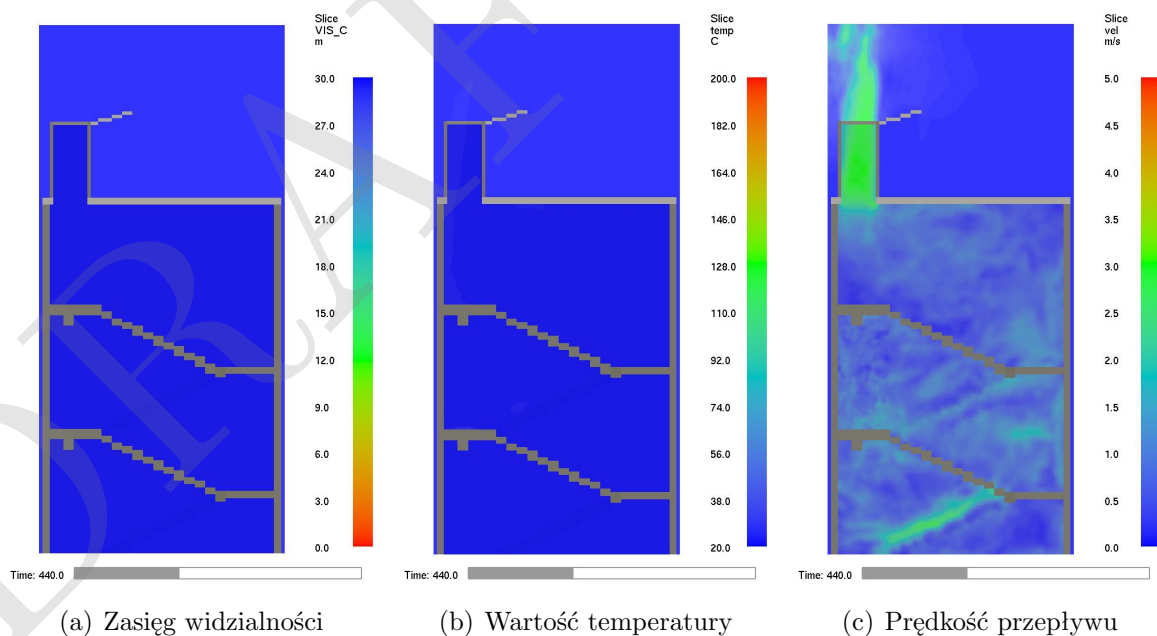
Rysunek 11. Warunki w klatce schodowej po 370 s – uruchomienie systemu oddymiania w 360 sekundzie symulacji



Rysunek 12. Warunki w klatce schodowej po 400 s – usuwanie dymu

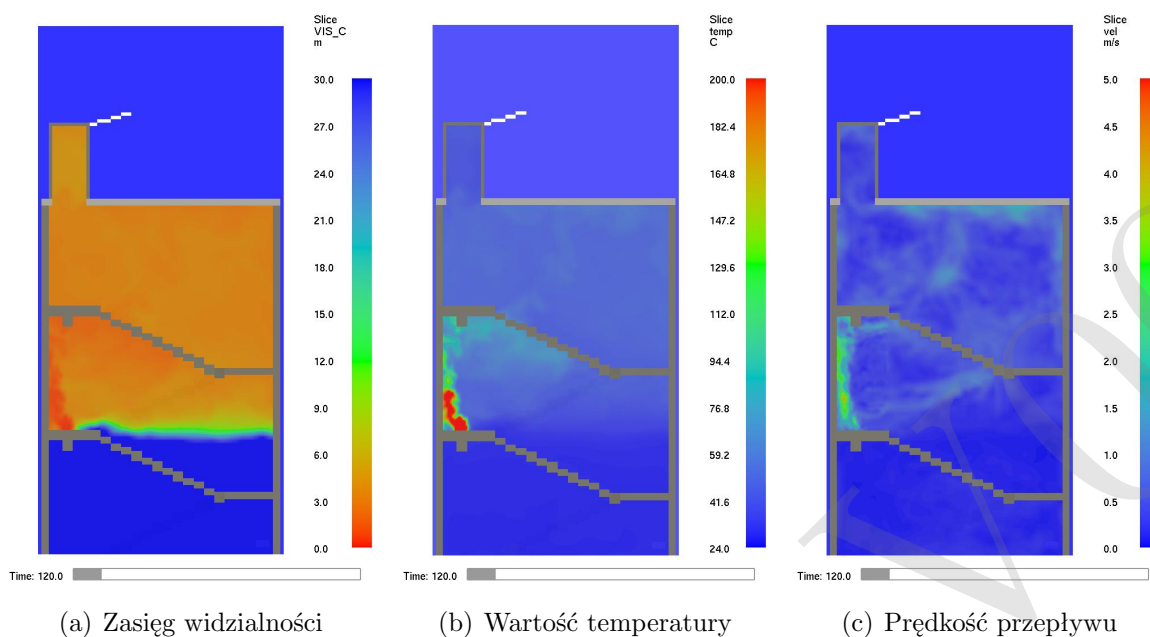


Rysunek 13. Warunki w klatce schodowej po 420 s – usuwanie dymu

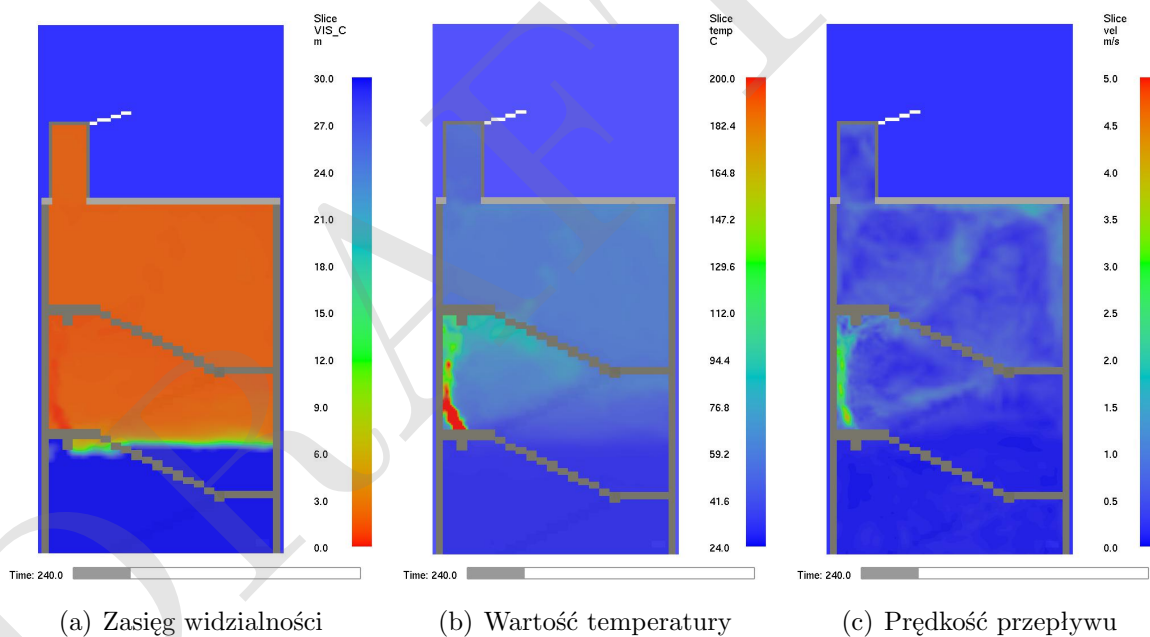


Rysunek 14. Warunki w klatce schodowej po 440 s – dym całkowicie usunięty z przestrzeni klatki

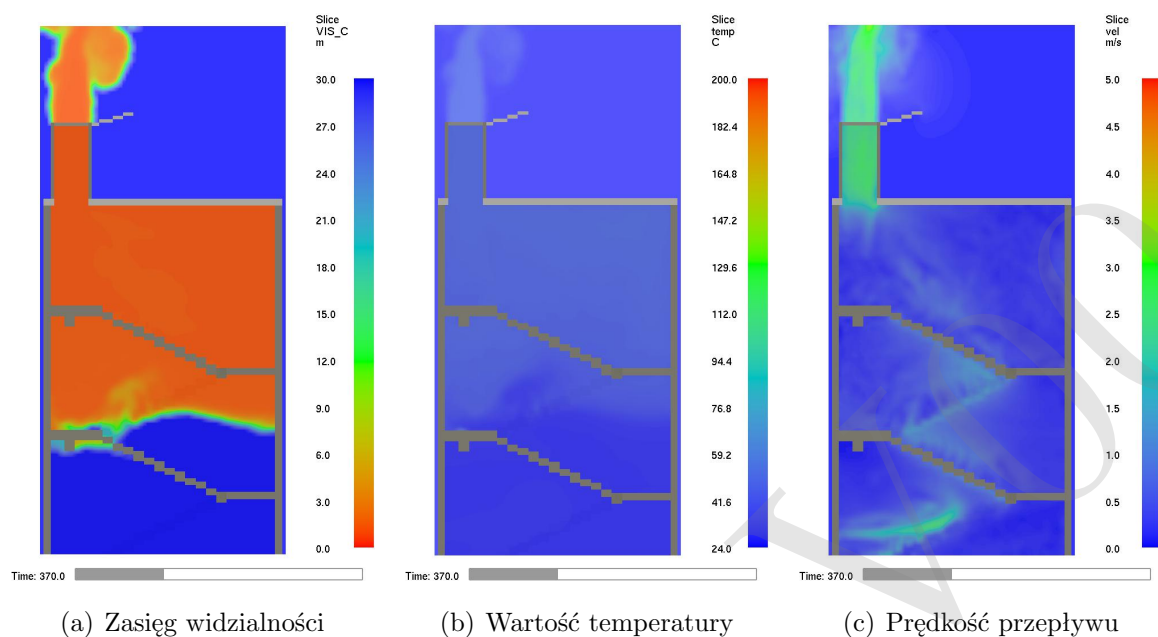
Scenariusz 2 – warunki letnie



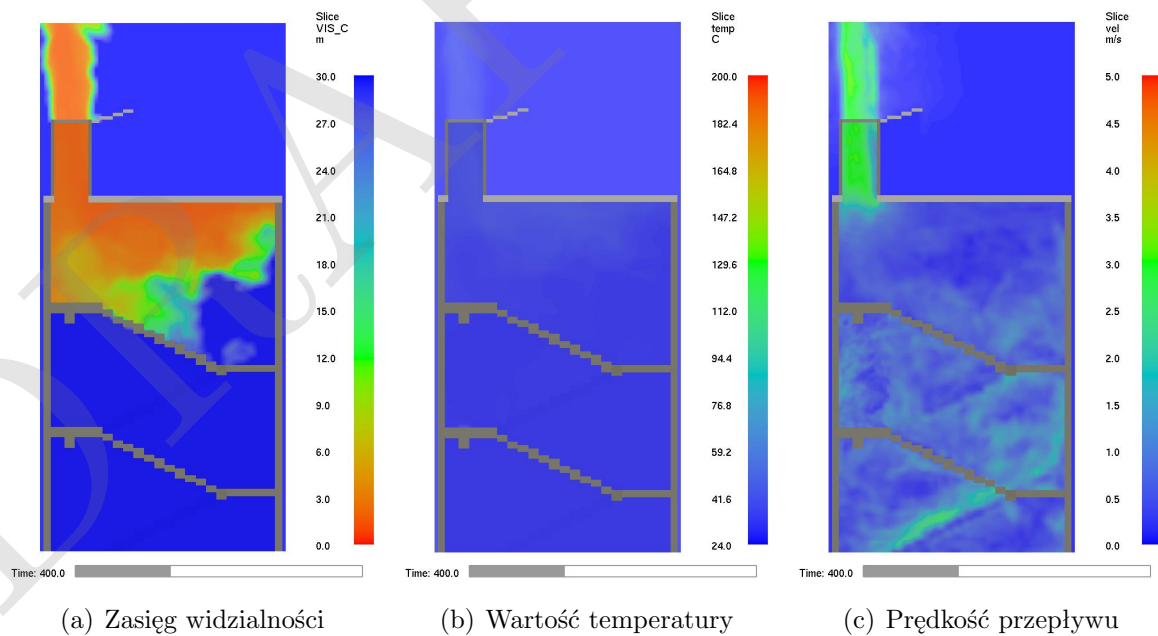
Rysunek 15. Warunki w klatce schodowej po 120 s – napływ dymu do klatki



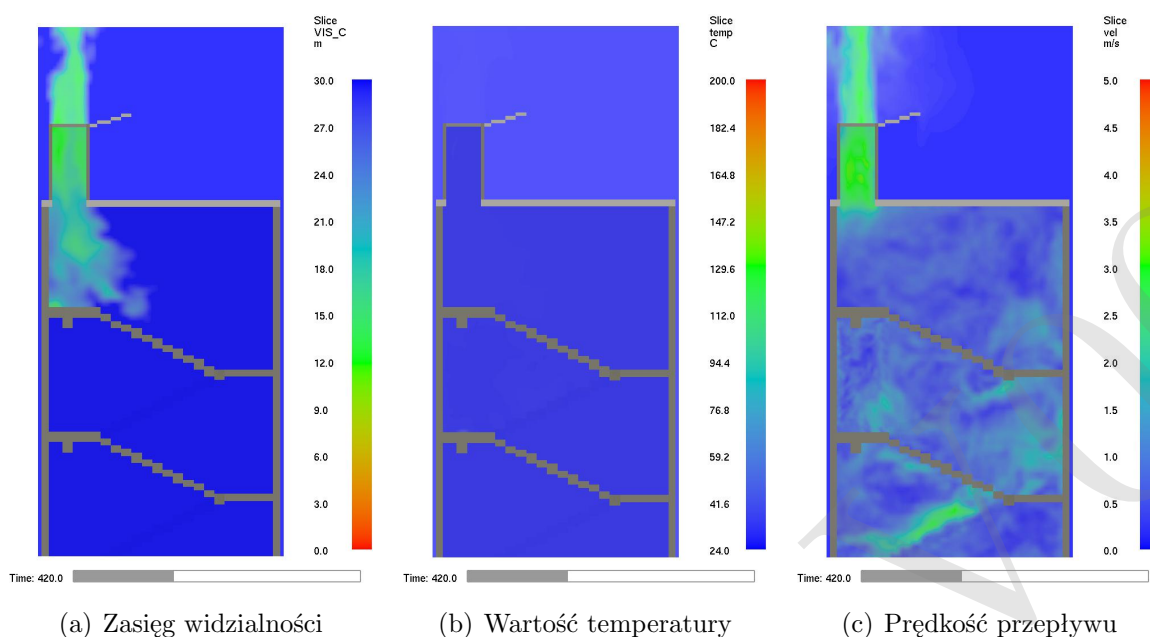
Rysunek 16. Warunki w klatce schodowej po 240 s – napływ dymu do klatki



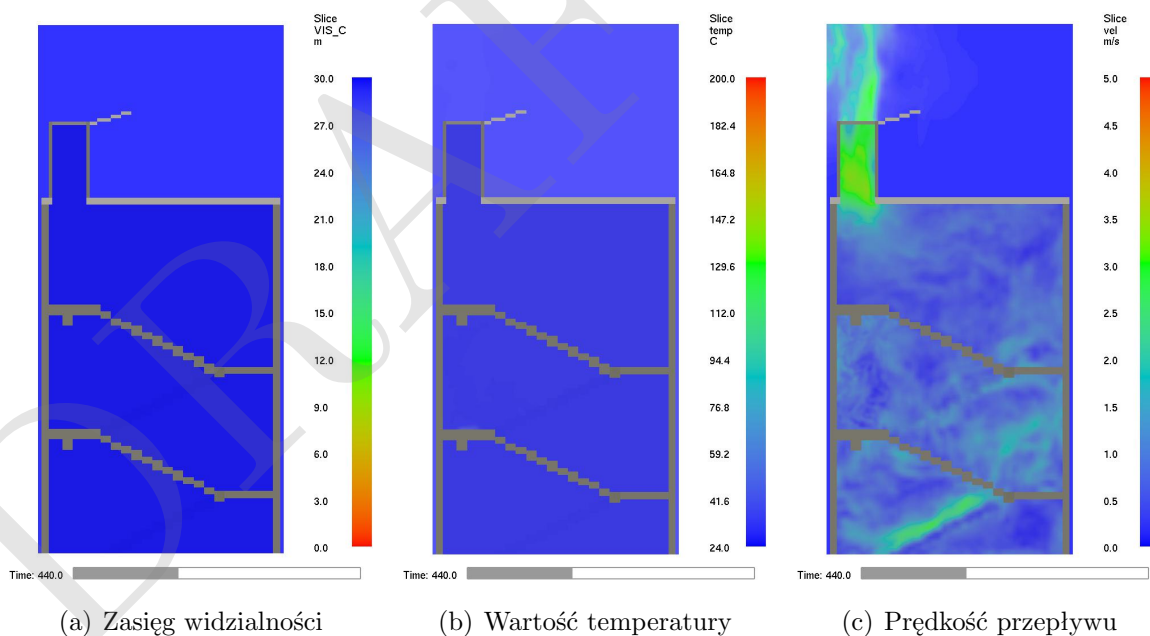
Rysunek 17. Warunki w klatce schodowej po 370 s – uruchomienie systemu oddymiania w 360 sekundzie symulacji



Rysunek 18. Warunki w klatce schodowej po 400 s – usuwanie dymu

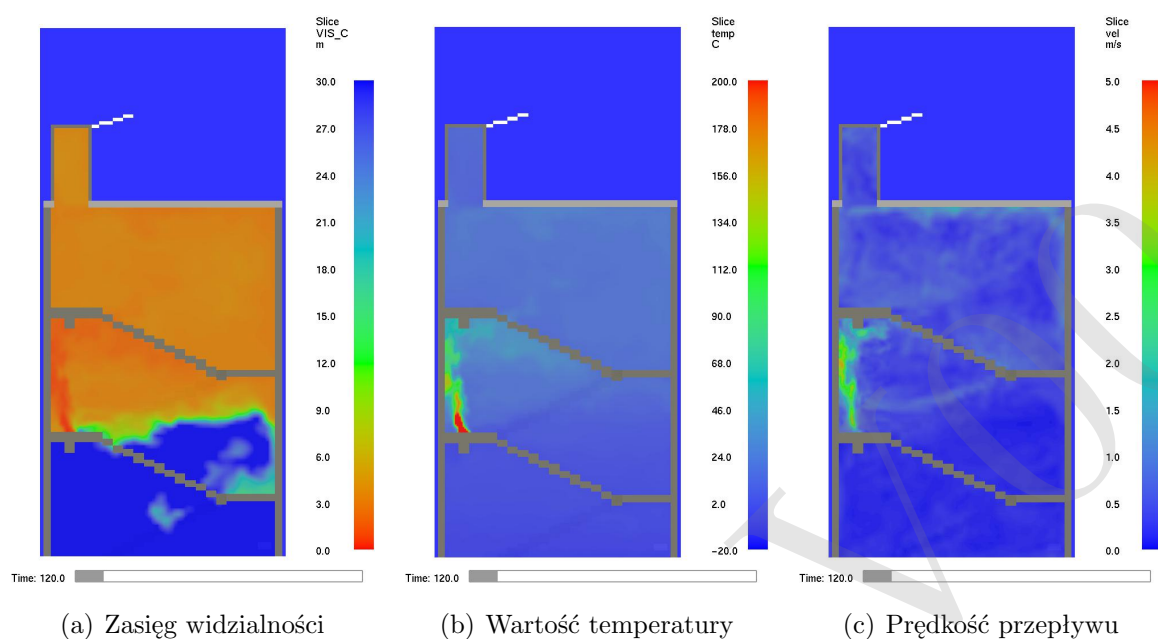


Rysunek 19. Warunki w klatce schodowej po 420 s – usuwanie dymu

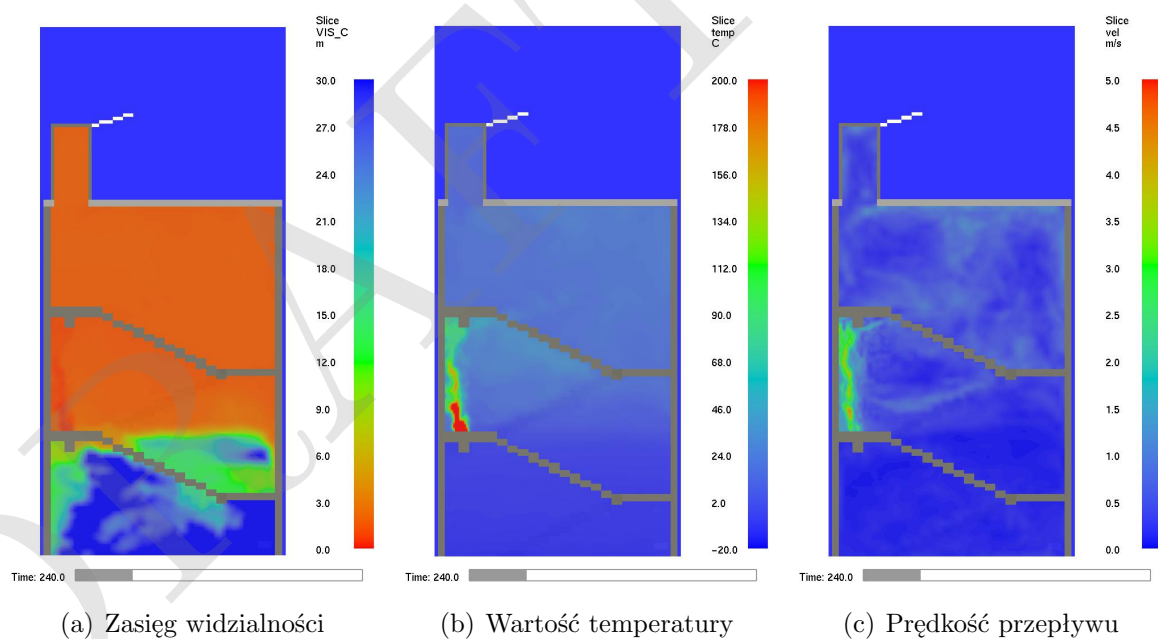


Rysunek 20. Warunki w klatce schodowej po 440 s – dym całkowicie usunięty z przestrzeni klatki

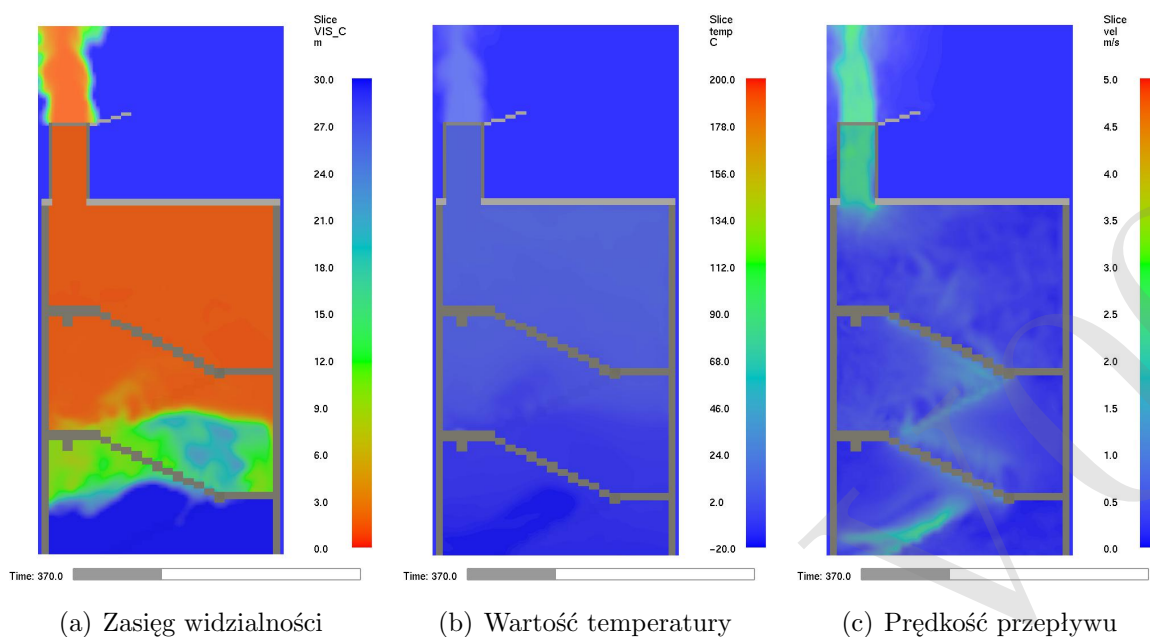
Scenariusz 3 – warunki zimowe



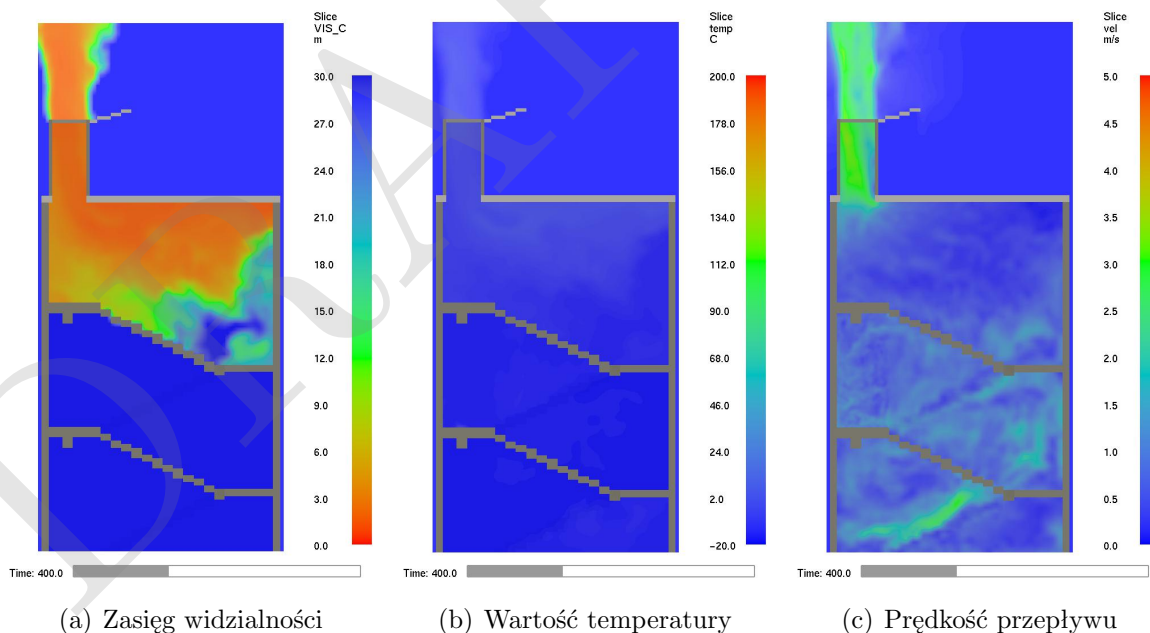
Rysunek 21. Warunki w klatce schodowej po 120 s – napływ dymu do klatki



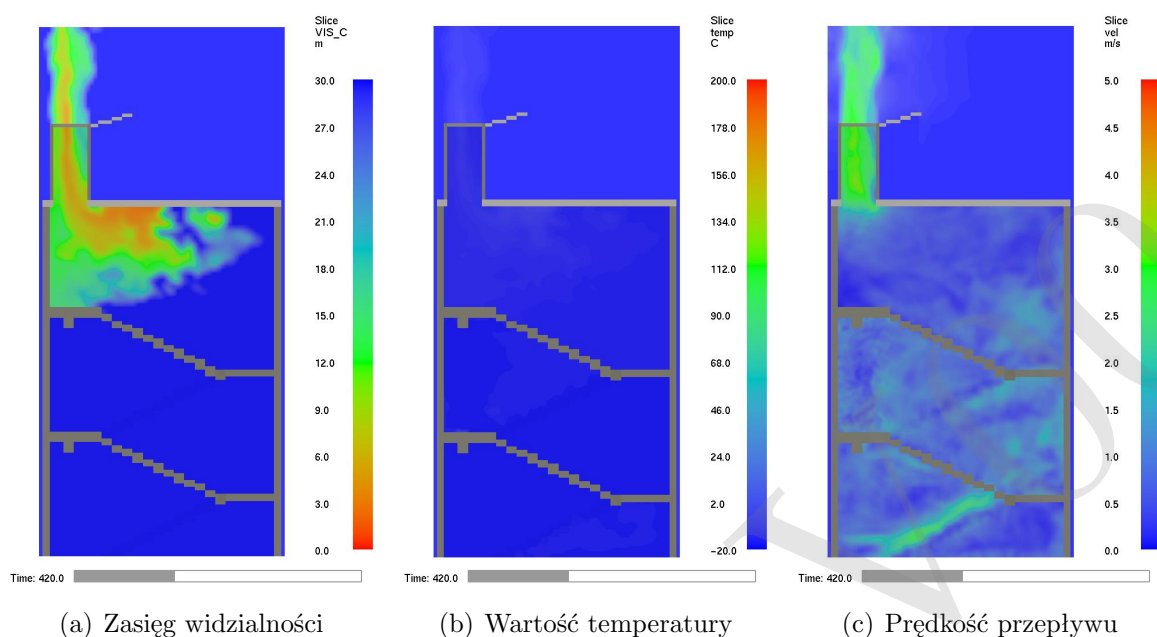
Rysunek 22. Warunki w klatce schodowej po 240 s – napływ dymu do klatki



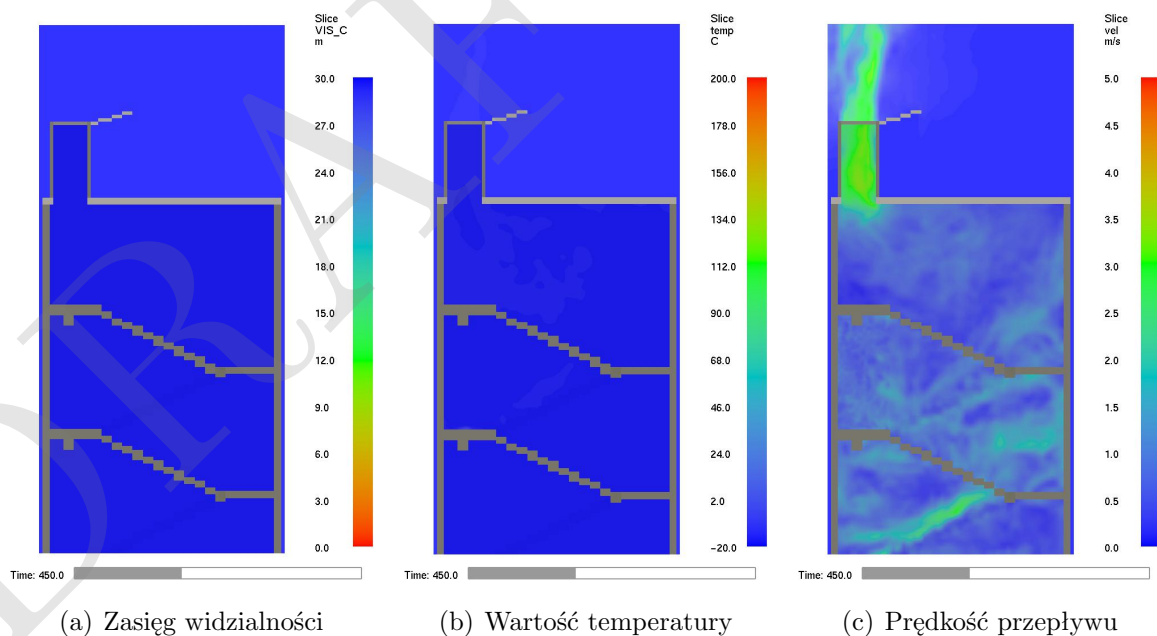
Rysunek 23. Warunki w klatce schodowej po 370 s – uruchomienie systemu oddymiania w 360 sekundzie symulacji



Rysunek 24. Warunki w klatce schodowej po 400 s – usuwanie dymu



Rysunek 25. Warunki w klatce schodowej po 420 s – usuwanie dymu



Rysunek 26. Warunki w klatce schodowej po 450 s – dym całkowicie usunięty z przestrzeni klatki

6. 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 [7]. 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 [3]:

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

gdzie: $\operatorname{erfc}()$ – uzupełniająca funkcja błędu; w_o – wartość odczytana; w_r – wartość rzeczywista. Na podstawie [8] 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 $8700 \text{ m}^2/\text{kg}$.

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%

7. Wyniki analizy

Scenariusz 1 w warunkach izotermicznych. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że od początku symulacji dym przemieszczał się ku górze klatki schodowej, 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 [1] oddymianie rozpoczęło 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 80 sekund.

Scenariusz 2 w warunkach letnich. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że od początku symulacji dym przemieszczał się ku górze klatki schodowej, skąd następnie był usuwany przez znajdującą się tam klapę dymową. Wygaszenie pożaru nastąpiło po czasie 300 s od początku obliczeń numerycznych, a oddymianie rozpoczęło w 360 s. Od samego początku uruchomienia instalacji usuwania dymu i ciepła, warunki panujące w klatce schodowej poprawiają się, a dym ostatecznie zostaje całkowicie usunięty. Dla scenariusza w warunkach letnich określono, że usunięcie dymu do poziomu 95% transmitancji nad spocznikiem najwyższej kondygnacji nastąpi po czasie 80 sekund.

Scenariusz 3 w warunkach zimowych. Stwierdzono, że od początku oddymiania dym przemieszczał się ku górze klatki schodowej, gdzie następnie był usuwany przez klapę dymową. Tak jak w poprzednich symulacjach, uruchomienie instalacji usuwania dymu i ciepła nastąpiło po czasie 360 s od początku analizy. 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 90 sekund.

8. Podsumowanie i wnioski

W oparciu o przeprowadzoną analizę, stwierdza się, że:

1. System grawitacyjnej instalacji usuwania dymu i ciepła z nawiewem mechanicznym 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 [1] wynosił odpowiednio:
 - scenariusz 1 (warunki izotermiczne) – 80 s;
 - scenariusz 2 (warunki letnie) – 80 s;
 - scenariusz 3 (warunki zimowe) – 90 s.Czas ten był liczony od momentu uruchomienia systemu oddymiania.
3. W żadnym z wytypowanych scenariuszy pożarowych, nie został przekroczony maksymalny czas oddymiania wynoszący 100,8 s.
4. Po aktywacji oddymiania, dym przepływał w górę klatki schodowej, skąd następnie był usuwany, przez zainstalowaną tam klapę oddymiającą.
5. Dym z klatki schodowej jest usuwany niezależnie od wartości temperatury, występującej na zewnątrz budynku.
6. W analizie niepewności, przedstawionej w punkcie 6 raportu, sprawdzono poprawność wyników uzyskanych z symulacji. Odczytane wartości zawierają się w dopuszczalnej tolerancji programu.

Na tej podstawie stwierdza się, że projektowany system oddymiania w połączeniu z mechanicznym nawiewem kompensacyjnym, zapewnią wymaganą sprawność funkcjonalną, zgodną z zasadami wiedzy technicznej. Dodatkowo, zgodnie z wytycznymi [1] 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 dodatkowo podniesie poziom sprawności przedmiotowej instalacji oddymiania.