



Tel. (+48) 42 637 26 00, Fax: (+48) 42 637 26 32  
e-mail: biuro@grid-lodz.pl, www.grid-lodz.pl

TYTUŁ OPRACOWANIA	<b>Analiza systemu wentylacji pożarowej w garażu podziemnym w kompleksie zabudowy usługowej na potrzeby Szczecińskiego Parku Naukowo – Technologicznego przy ul. Niemierzyńskiej w Szczecinie</b>	
DATA	Grudzień 2009 r.	
ZLECENIODAWCA	Nazwa	KECMAN – Projektowanie, Wykonawstwo, Nadzór
	Adres	70-470 Szczecin Al. Wojska Polskiego 13A
	NIP	599 247 23 76
	Tel.	091 482 58 14

AUTOR OPRACOWANIA		
<b>GRID</b> <b>PAWEŁ BRZEZIŃSKI</b> Ul. Piotrkowska 213 lok. 3 90-451 Łódź NIP 725-112-95-45	..... pieczęć	..... podpis

PRZYGOTOWANIE MODELU I RAPORTU	<b>RENATA OLLESZ</b>	..... podpis
SPRAWDZENIE DOKUMENTACJI	<b>DOROTA MICHALCZYK</b>	..... podpis
WERYFIKACJA OPRACOWANIA	<b>DOROTA BRZEZIŃSKA</b>	..... podpis



## **Spis treści**

1. Przedmiot i cel opracowania .....	3
2. Zakres opracowania .....	3
3. Założenia przyjęte do analiz.....	4
3.1 Szczegółowe wytyczne przekazane przez Zlecającego, przyjęte do analiz:.....	6
3.2 Założenia w zakresie pracy instalacji w trybie wentylacji oddymiającej .....	8
3.3 Wielkość i szybkość rozwoju pożaru.....	11
3.4 Analizowane parametry pożaru .....	11
3.5 Scenariusze pożarowe przyjęte do analiz.....	12
3.6 Przewidywany czas ewakuacji.....	12
4. Metodyka wykonania symulacji oraz podstawowe dane techniczne programu FDS... ..	15
Model hydrodynamiczny .....	15
Model spalania .....	17
Model promieniowania cieplnego .....	17
5. Wyniki symulacji.....	19
5.1 Wyniki symulacji „PA” przeprowadzonej dla instalacji pracującej w trybie wentylacji pożarowej .....	20
5.2 Wyniki symulacji „PB” przeprowadzonej dla instalacji pracującej w trybie wentylacji pożarowej.....	24
5.3 Przewidywana temperatura pod stropem garażu dla scenariusza pożaru „PA”....	28
5.4 Przewidywana temperatura w płaszczyźnie montażu wentylatorów strumieniowych	28
5.5 Przewidywana maksymalna temperatura dymu na wentylatorach oddymiających - wyciągowych .....	29
6. Wnioski i podsumowanie.....	30
7. Literatura .....	32

## **Spis załączników**

### **Załącznik 1**

Certyfikat potwierdzający ukończenie kursu w zakresie wykonywania symulacji komputerowych .....	33
---	----



## **Przedmiot i cel opracowania**

Przedmiotem analizy jest instalacja wentylacji pożarowej w garażu podziemnym w kompleksie zabudowy usługowej na potrzeby Szczecińskiego Parku Naukowo – Technologicznego przy ul. Niemierzyńskiej w Szczecinie, przy zastosowaniu wentylatorów strumieniowych firmy BSH Klima Sp. z o.o..

Celem analizy jest określenie warunków panujących w garażu w zakresie:

- przewidywanego zasięgu widzialności i temperatury na przejściach ewakuacyjnych podczas pożaru, w czasie przewidzianym na ewakuację, przy instalacji pracującej w trybie wentylacji pożarowej,
- przewidywanej maksymalnej chwilowej temperatury powietrza pod stropem kondygnacji objętej pożarem w czasie do 15 minut od jego rozpoczęcia,
- przewidywanej maksymalnej temperatury na wentylatorach oddymiających-wyciągowych oraz strumieniowych w czasie do 15 minut od momentu rozpoczęcia pożaru.

### **1. Zakres opracowania**

Analizowany obszar obejmuje jedną kondygnację garażu podziemnego („-1”) w kompleksie zabudowy usługowej na potrzeby Szczecińskiego Parku Naukowo – Technologicznego przy ul. Niemierzyńskiej w Szczecinie (rys. 1).

W opracowaniu przedstawione zostały wyniki symulacji komputerowych CFD przeprowadzonych na trójwymiarowym modelu garażu, uwzględniającym podstawowe parametry techniczne obiektu, takie jak geometria, lokalizacja otworów wentylacji naturalnej i mechanicznej oraz rozmieszczenie wentylatorów strumieniowych. Wszystkie założenia w zakresie architektury obiektu, pracy instalacji (w tym wentylacji oddymiającej), wprowadzone zostały na podstawie informacji i projektów technicznych przekazanych przez Zlecającego i są opisane w punkcie 3.

Określony został przewidywany czas ewakuacji użytkowników garażu w przypadku pożaru oraz czas, po którym na przejściach ewakuacyjnych nastąpi przekroczenie dopuszczalnych wartości przewidywanego zasięgu widzialności oraz przewidywanej temperatury. Dokonano oceny wpływu tych parametrów na skuteczną ewakuację.

Określona została przewidywana maksymalna chwilowa temperatura powietrza pod stropem. Określona została także przewidywana maksymalna temperatura oddziałująca na wentylatory oddymiające-wyciągowe oraz wentylatory strumieniowe w czasie do 15 minut od momentu rozpoczęcia pożaru. Dokonano analizy ilości wentylatorów strumieniowych, które mogą zostać wykluczone przez pożar i wpływu ich ewentualnego wykluczenia na pracę systemu.



## **2. Założenia przyjęte do analiz**

Do analiz przyjęte zostały założenia początkowe wynikające z projektu architektonicznego obiektu, projektu wentylacji strumieniowej oddymiającej, a także inne informacje i wytyczne otrzymane od Zlecającego zawarte w niniejszym punkcie.

Założono możliwość powstania pożaru jedynie na miejscach postojowych.

Za przejścia ewakuacyjne przyjęto wszystkie przejazdy. Założono, że ewakuujący się nie będą się przemieszczali po miejscach postojowych. Usytuowanie miejsc postojowych i przejść ewakuacyjnych przedstawia rysunek 1.

Założono, że miejsca postojowe dla osób niepełnosprawnych będą się znajdowały w pobliżu wyjść ewakuacyjnych.

Założono pożar jednego samochodu osobowego. Przyjęto, że z w analizowanym garażu nie będą się znajdowały samochody inne niż osobowe. Wielkość i szybkość rozwoju pożaru opisano w punkcie 3.3.

W analizowanym garażu nie występuje instalacja tryskaczowa.

Przyjęte do analiz rozmieszczenie punktów nawiewno - wyciągowych oraz wentylatorów strumieniowych przedstawia rysunek 1.

Analizy rozwoju pożaru i rozprzestrzeniania się dymu przeprowadzono dla kilku scenariuszy pożarowych, z których wybrano i przedstawiono w raporcie dwa najbardziej niekorzystne. Szczegółowy opis pracy instalacji w trybie wentylacji oddymiającej przedstawiono w punkcie 3.2.



Rysunek 1. Schemat garażu i instalacji wentylacji pożarowej – kondygnacja „-1”.

### 3.1 Szczegółowe wytyczne przekazane przez Zlecającego, przyjęte do analiz:

- a. Wysokość garażu od posadzki do stropu wynosi ok. 2,60 m.
- b. Pod stropem garażu na kondygnacji „-1”, zgodnie z rysunkiem 1, występują przewody instalacyjne okrągłe o maksymalnej średnicy 0,25 m i prostokątne o wymiarach od 0,25 m x 0,25 m do 0,71 m x 0,45 m zlokalizowane pod stropem garażu, „głowice” wokół słupów o dolnej krawędzi od 0,1 m do 0,25 m poniżej dolnej krawędzi stropu oraz podciągi o dolnej krawędzi na wysokości 2 m od posadzki garażu.
- c. Garaż na kondygnacji „-1” stanowi oddzielną strefę pożarową i oddzielony jest od pozostałych stref stropami, ścianami oraz drzwiami pożarowymi.
- d. Analizowany obszar garażu został podzielony na dwie strefy detekcji dymu: strefę detekcji dymu „A” i strefę detekcji dymu „B”. Podział garażu na strefy detekcji dymu przedstawiono na rysunku 1.
- e. Wentylatory oddymiające zlokalizowane są na poziomie terenu  $\pm 0,00$ .
- f. Należy zagwarantować dostarczanie powietrza przez bramy wjazdowe, w czasie pracy instalacji wentylacji pożarowej, poprzez ich otwarcie lub zastosowanie bram wjazdowych ażurowych (powierzchnia perforacji netto wynosi minimum 50%).
- g. W analizowanym garażu założono mechaniczny nawiew i wyciąg powietrza, przez punkty nawiewno - wyciągowe „NW” („NW1”, „NW2”), których lokalizację przedstawia rysunek 1. Wydajności tych punktów przedstawiono w punkcie 3.2.
- h. Punkty nawiewno - wyciągowe „NW” („NW1”, „NW2”) o powierzchni czynnej  $5,0 \text{ m}^2$  każdy, zlokalizowane są w stropie garażu (rys. 1).
- i. Przyjęto maksymalną prędkość przepływu powietrza w punktach nawiewno - wyciągowych (w przekroju netto) wynoszącą: 10 m/s dla wyciągu, 6 m/s dla nawiewu.
- j. Do analiz przyjęto wentylatory strumieniowe jednokierunkowe Jet GAXO 400 o wydajności na II biegu –  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  oraz rewersyjne Jet GAXR 400 o wydajności na II biegu –  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  przy kierunku do „przodu” i  $1,38 \text{ m}^3/\text{s}$  przy kierunku do „tyłu”, i o odporności  $400^\circ\text{C}/2\text{h}$ , firmy BSH Klima Sp. z o.o..
- k. Wysokość dolnej krawędzi wentylatorów strumieniowych od posadzki wynosi ok. 2,0 m.
- l. Lokalizację wentylatorów strumieniowych przedstawia rysunek 1.



- m. Podczas pracy instalacji w trybie wentylacji pożarowej wentylatory pracują na II biegu.
- n. Przyjęto, że punkty wyciągowe są uruchamiane natychmiast po wykryciu pożaru przez dwie czujki dymowe w tej samej strefie detekcji dymu i osiągają obliczeniową wydajność nie później niż po 40 sekundach, od momentu wykrycia pożaru (tj. po ok. 120 sekundach od momentu rozpoczęcia pożaru).
- o. Przyjęto, że wentylatory strumieniowe są uruchamiane po takim czasie, by osiągnęły obliczeniową wydajność po 220 sekundach od momentu wykrycia pożaru (tj. po ok. 300 sekundach od momentu rozpoczęcia pożaru).
- p. Temperatura początkowa przyjęta we wszystkich symulacjach wynosi  $20^{\circ}\text{C}$ , współczynnik „soot yield” - 0,164. Gęstość siatki przyjęta w symulacjach w żadnym kierunku nie przekracza 0,3 m.



### 3.2 Założenia w zakresie pracy instalacji w trybie wentylacji oddymiającej

#### ***Szczegółowy opis pracy systemu w przypadku pożaru w strefie detekcji dymu „A”***

W przypadku wystąpienia pożaru na kondygnacji „-1” w strefie detekcji dymu „A”, załączane są punkty nawiewno - wyciągowe: „NW1” działający jako wyciąg z wydajnością 150.000 m<sup>3</sup>/h oraz „NW2” działający jako nawiew z wydajnością 100.000 m<sup>3</sup>/h. Powietrze uzupełniane jest dodatkowo przez bramy wjazdowe „BW1” i „BW2”.

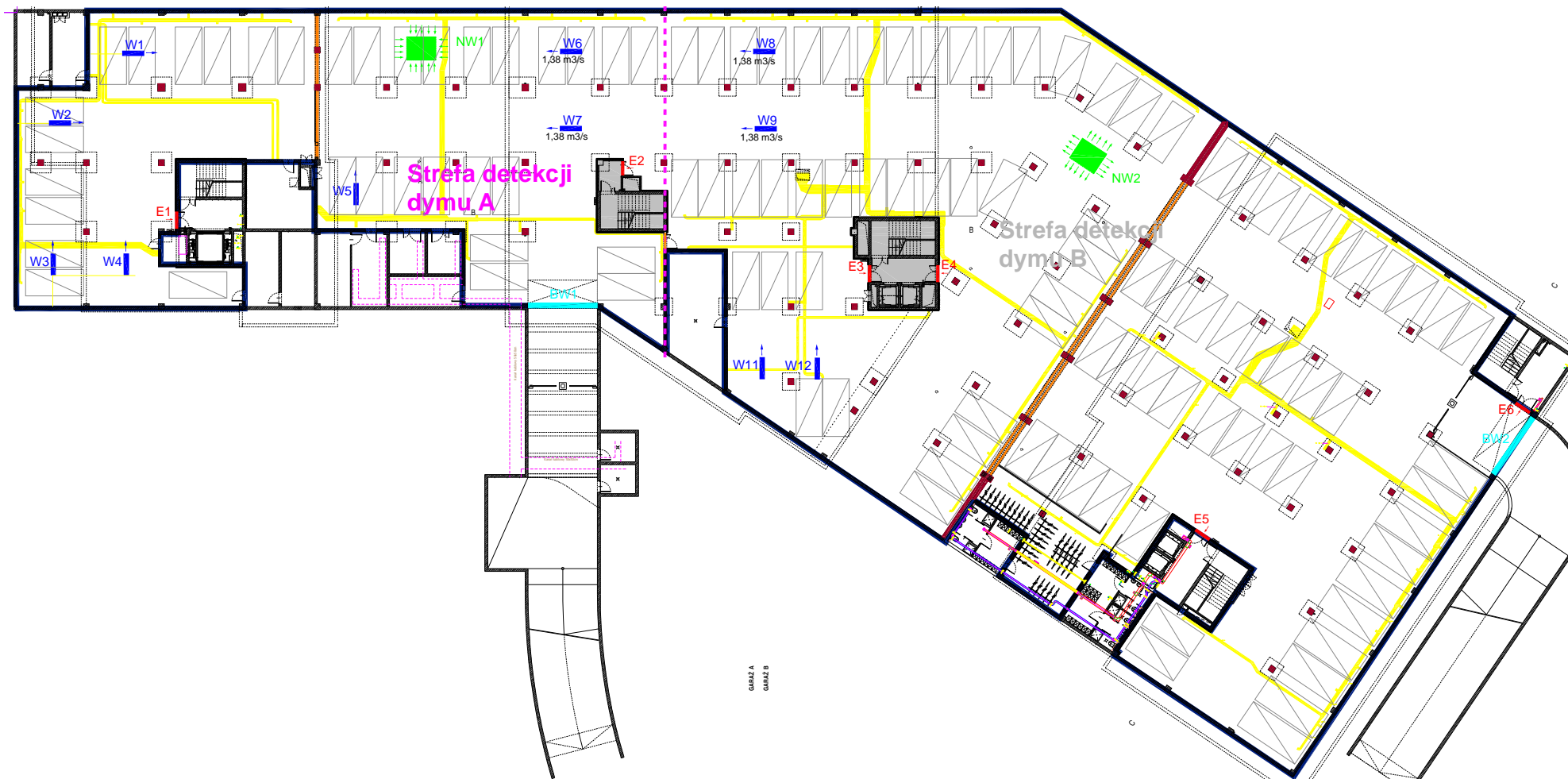
Numery pracujących wentylatorów strumieniowych oraz kierunki ich działania przedstawiono na rysunku 2.

#### ***Szczegółowy opis pracy systemu w przypadku pożaru w strefie detekcji dymu „B”***

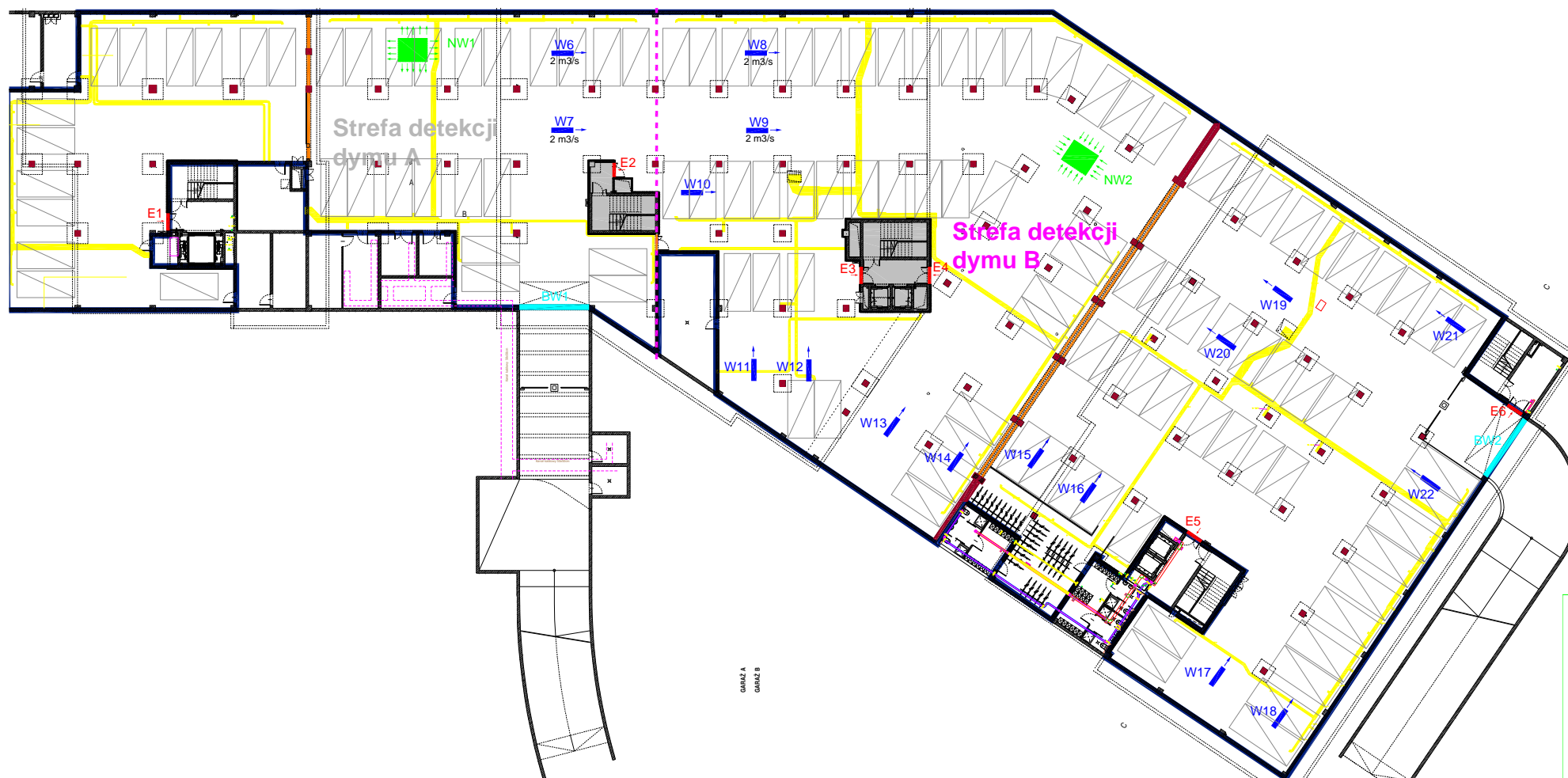
W przypadku wystąpienia pożaru na kondygnacji „-1” w strefie detekcji dymu „B”, załączane są punkty nawiewno - wyciągowe: „NW2” działający jako wyciąg z wydajnością 150.000 m<sup>3</sup>/h oraz „NW1” działający jako nawiew z wydajnością 100.000 m<sup>3</sup>/h. Powietrze uzupełniane jest dodatkowo przez bramy wjazdowe „BW1” i „BW2”.

Numery pracujących wentylatorów strumieniowych oraz kierunki ich działania przedstawiono na rysunku 3.





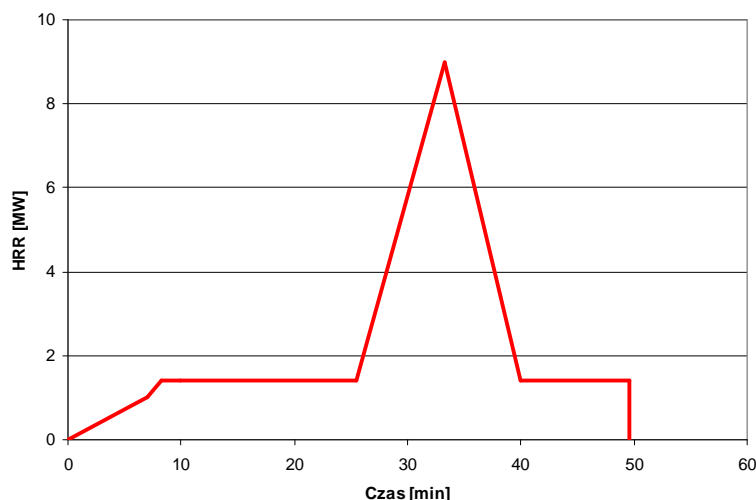
Rysunek 2. Praca instalacji w trybie wentylacji oddymiającej w przypadku pożaru w strefie detekcji dymu „A”.



Rysunek 3. Praca instalacji w trybie wentylacji oddymiającej w przypadku pożaru w strefie detekcji dymu „B”.

### 3.3 Wielkość i szybkość rozwoju pożaru

Na podstawie raportu dr M. Janssens'a z 2004 roku [7] do symulacji przyjęty został pożar rozwijający się zgodnie z krzywą rozwoju pożaru przedstawioną na wykresie 1.



Wykres 1. Krzywa rozwoju pożaru [7].

### 3.4 Analizowane parametry pożaru

W zakresie analiz, mających na celu określenie warunków panujących w czasie ewakuacji w przypadku pożaru w analizowanym obiekcie, wykonane zostały symulacje rozkładu temperatury i zasięgu widzialności na wysokości 1,8 m [3] od posadzki garażu.

Zgodnie z danymi literaturowymi, graniczne wartości poszczególnych parametrów, będących przedmiotem analizy, wynoszą odpowiednio:

- o temperatura zagrażająca życiu ludzi – 60°C (ze względu na możliwe różnice pomiędzy temperaturą otrzymaną z symulacji a temperaturą rzeczywistą, opisane w rozdz. 4, za graniczną temperaturę na drogach ewakuacyjnych otrzymaną z symulacji przyjmuje się 52°C) [1, 3, 9],
- o zasięg widzialności – 10 m dla elementów konstrukcyjnych, co odpowiada widzialności z 30 m znaków podświetlanych z natężeniem 80 lx [1, 3, 9].

### 3.5 Scenariusze pożarowe przyjęte do analiz

Z przeanalizowanych scenariuszy pożarowych zostały wybrane dwa, stwarzające najbardziej niekorzystne warunki do przeprowadzenia ewakuacji. Lokalizacja pożarów została zaznaczona na rysunkach 4 - 5 (patrz punkty 5.1 - 5.2).

### 3.6 Przewidywany czas ewakuacji

Analizę przewidywanego czasu ewakuacji wykonano w oparciu o brytyjski Published Document PD 7974 -6: 2004 [1].

**Przy określaniu czasów ewakuacji wzięto pod uwagę istniejący system zabezpieczenia przeciwpożarowego, a w szczególności:**

- pełną ochronę obiektu przez system sygnalizacji pożarowej,
- wyposażenie obiektu w dźwiękowy system ostrzegawczy lub syreny alarmowe,
- wyposażenie obiektu w hydranty wewnętrzne i gaśnice,
- odpowiednie przeszkolenie personelu ochrony i obsługi obiektu.

Uwzględniając powyższe zastosowano następujące kategorie:

- 1) jakości systemu alarmowego - **A2** - (automatyczne wykrycie pożaru i uruchomienie niezbędnych urządzeń w zagrożonej strefie za pomocą sygnałów alarmowych II stopnia, przy czym za alarm drugiego stopnia jest uznawany sygnał alarmowy z dwóch czujek dymu w tej samej strefie detekcji dymu),
- 2) wpływu skomplikowania budynku na czas ewakuacji - **B1** - proste powierzchnie jednokondygnacyjne zapewniające łatwą orientację (rozpatruje się tu jedynie ewakuację z garaży),
- 3) wpływu przygotowania stałego personelu i służb ochrony na czas ewakuacji - **M2**.

Dla powyższych kategorii (A2, B1 i M2) czas do rozpoczęcia ewakuacji (pre-movement time), tj. przedział czasu od momentu, w którym zostało przekazane ostrzeżenie o zagrożeniu do momentu, w którym pierwsza osoba przebywająca w obiekcie rozpoczęła ewakuację, wynosi 1 min., a do momentu, w którym 99% osób przebywających w obiekcie rozpoczęło ewakuację - 4 min. (parking dla osób nie znających dobrze układu garażu) lub mniej w przypadku gdy dym dotarł do nich wcześniej.

Przyjęto, że osoby znajdujące się na stanowiskach postojowych zlokalizowanych w pobliżu źródła pożaru ewakuują się w czasie ewakuacji „pierwszej osoby”.

Zakłada się, iż w przypadku pożaru ewakuujący się ludzie będą się przemieszczać wyznaczonymi przejściami ewakuacyjnymi, do najbliższych wyjść ewakuacyjnych w kierunkach innych niż lokalizacja pożaru. Najbardziej niekorzystne warianty tras przejść ewakuacyjnych w zależności od scenariusza pożarowego są zaznaczone na rysunkach 4 - 5.

Długości tras przejść ewakuacyjnych dla osób znajdujących się w pobliżu źródła pożaru i rozpoczynających ewakuację jako „pierwsza osoba”, w poszczególnych scenariuszach pożarowych, wynoszą:

PA:  $L_{PA-1} = 59 \text{ m}$ ,

PB:  $L_{PB-1} = -$ .

Długości najbardziej niekorzystnych tras przejść ewakuacyjnych dla osób rozpoczynających ewakuację po czasie dla „99% osób” w poszczególnych scenariuszach pożarowych, wynoszą:

PA:  $L_{PA-99\%} = -$ ,  
PB:  $L_{PB-99\%} = 60 \text{ m}$ .

Prędkość poruszania się ludzi po przejściach ewakuacyjnych przyjęto równą 1,2 m/s. Czas od rozpoczęcia ewakuacji do dotarcia do wyjścia ewakuacyjnego dla osób znajdujących się w pobliżu źródła pożaru i rozpoczynających ewakuację po czasie dla „pierwszej osoby”, w poszczególnych scenariuszach pożarowych, wynosi:

PA:  $T_{LPA-1} = 50 \text{ s}$ ,  
PB:  $T_{LPB-1} = -$ .

Czas od rozpoczęcia ewakuacji do dotarcia do wyjścia ewakuacyjnego dla osób rozpoczynających ewakuację po czasie dla „99% osób” dla najbardziej niekorzystnych tras przejść ewakuacyjnych w poszczególnych scenariuszach pożarowych, wynosi:

PA:  $T_{LPA-99\%} = -$ ,  
PB:  $T_{LPB-99\%} = 50 \text{ s}$ .

**Dla przyjętych parametrów rozwoju pożaru, na podstawie przeprowadzonych wstępnie analiz, przyjęto założenie, że czas uruchomienia sygnalizacji pożarowej w analizowanym obiekcie nie przekracza 80 s od momentu powstania pożaru (zasięg zadymienia pod stropem po czasie 80 s od rozpoczęcia pożaru przekracza średnicę 15 m, co gwarantuje zadziałanie co najmniej dwóch czujek dymowych, rozmieszczonych w rozstawie co 10 m).**



W związku z powyższym, czas poszczególnych etapów ewakuacji wynosi:

Przewidywany czas ewakuacji dla osób znajdujących się w pobliżu źródła pożaru i rozpoczynających ewakuację po czasie dla „pierwszej osoby”	
Rozpoczęcie ewakuacji	PA: 140 s
	PB: -
Dojście do wyjścia ewakuacyjnego	PA: 190 s
	PB: -



Przewidywany czas ewakuacji dla osób rozpoczynających ewakuację po czasie dla „99% osób” dla najbardziej niekorzystnych tras przejść ewakuacyjnych w poszczególnych scenariuszach	
Rozpoczęcie ewakuacji po czasie 320 s lub krótszym, jeśli dym dotrze wcześniej	PA: -
	PB: 200 s
Dojście do wyjścia ewakuacyjnego	PA: -
	PB: 250 s



### **3. Metodyka wykonania symulacji oraz podstawowe dane techniczne programu FDS**

Symulacje wykonane zostały za pomocą specjalistycznego oprogramowania **Fire Dynamics Simulator** (FDS), opracowanego przez National Institute of Standards and Technology – U.S. Department of Commerce.

FDS jest programem umożliwiającym trójwymiarowe symulacje rozwoju pożaru i rozprzestrzeniania się dymu w oparciu o techniki CFD. Bazuje on na numerycznych rozwiązaniach równań Naviera-Stokesa odpowiednich dla przepływów wywołanych ciągiem powstałym pod wpływem ognia, ze szczególnym naciskiem na transport dymu i ciepła. W czasie swego rozwoju program ukierunkowywany był na rozwiązywanie praktycznych problemów inżynierii ochrony przeciwpożarowej, stanowiąc jednocześnie narzędzie do analiz podstaw dynamiki ognia i spalania. Jak wykazały badania w skali rzeczywistej dokładności wyników uzyskiwanych w programie FDS, wartości przyrostów temperatury w warstwie dymu mogą różnić się od rzeczywistych o nie więcej niż 15%, z wyjątkiem warstwy podsufitowej (rozmieszczane są w niej wentylatory strumieniowe), dla której różnice mogą wynosić nie więcej niż 20%. Rzeczywiste spadki widzialności są z kolei zawsze mniejsze od określonych za pomocą programu FDS, nawet do 30%. Tak więc przy ocenie warunków bezpieczeństwa pożarowego w obiekcie, aby zapewnić odpowiedni margines bezpieczeństwa, uzyskane za pomocą symulacji komputerowych z użyciem programu FDS wartości przyrostów temperatur należy zwiększać o 15%, przy czym w warstwie podsufitowej o 20%, natomiast uzyskane wartości spadku widzialności można wykorzystywać bez zmian [6, 9].

Do opisu zjawiska turbulencji w programie FDS zastosowane zostały **Symulacje Wielkich Wirów** (ang. - Large Eddy Simulation - LES), które opisują proces turbulentnego mieszania się gazowego paliwa i produktów spalania z powietrzem otaczającym strefę spalania. Są one stosowane w przypadku symulacji większości pożarów i określają szybkość spalania paliwa oraz rozprzestrzeniania się dymu i gorących gazów. Podstawowym założeniem, przy stosowaniu modelu LES jest to, że większość wirów powstających w procesie mieszania się gazów jest wystarczająco duża, aby mogły one z zadowalającą dokładnością być obliczane za pomocą równań dynamiki płynów. Wszystkie niewielkie ruchy wirowe są obliczane z dużym przybliżeniem lub pomijane.

W programie FDS zastosowano następujące modele służące do opisu zjawisk procesowej mechaniki płynów:

- model hydrodynamiczny,
- model spalania,
- model promieniowania cieplnego,
- model przenikania ciepła przez przegrody,
- model pirolizy.

#### **Model hydrodynamiczny**

Program FDS rozwiązuje numerycznie odpowiednią formę równań Naviera-Stokesa dla przepływów wywołanych przez ogień, ze szczególnym naciskiem na ruch ciepła i transport dymu. Podstawowymi równaniami wykorzystywanymi w symulacjach są równania zachowania masy, momentu i energii dla rozszerzalnych termicznie, wieloskładnikowych gazów idealnych [5]:

- równanie ciągłości

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (3.1)$$

- równanie zachowania masy

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i \mathbf{u} = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{W}_i''' \quad (3.2)$$

Równanie zachowania masy (4.2) jest rozwiązywane dla każdego składnika będącego częścią mieszaniny ulegającej spalaniu. Jednocześnie muszą być spełnione następujące warunki:  $\sum_{i=0}^N Y_i = 1$ ,  $\sum_{i=0}^N \rho D_i \nabla Y_i = 0$  i  $\sum_{i=0}^N \dot{W}_i''' = 0$ , gdzie  $N$  oznacza ilość składników w mieszaninie. W równaniu (4.2)  $Y_i$  oznacza ułamek masowy  $i$ -tego składnika,  $D_i$  jest współczynnikiem dyfuzji składnika  $i$  w mieszaninie, a  $\dot{W}_i'''$  szybkością wytwarzania  $i$ -tego składnika.

- równanie zachowania energii

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} - \frac{Dp}{Dt} = \nabla \cdot k \nabla T + \sum_i \nabla \cdot h_i \rho D_i \nabla Y_i - \nabla \cdot \mathbf{q}_r \quad (3.3)$$

- równanie zachowania pędu

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (3.4)$$

gdzie:

$D$  – współczynnik dyfuzji,

$\mathbf{f}$  – wektor sił zewnętrznych (z wyjątkiem przyciągania ziemskiego),

$\mathbf{g}$  – przyciąganie ziemskie,

$h$  – współczynnik przenikania ciepła,

$k$  – współczynnik przewodzenia ciepła,

$p$  – ciśnienie całkowite,

$\mathbf{q}_r$  – wektor promieniowania cieplnego,

$\dot{q}'''$  - ilość ciepła emitowanego na jednostkę objętości,

$T$  – temperatura,

$t$  – czas,

$\mathbf{u}$  – wektor prędkości,

$\dot{W}_i'''$  - wielkość produkcji  $i$ -tej komórki na jednostkę objętości,

$Y_i$  – skład masowy  $i$ -tej komórki,

$\rho$  - gęstość,

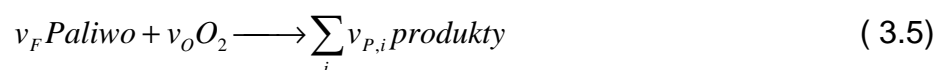
$\boldsymbol{\tau}$  - tensor naprężeń lepkich.



## Model spalania

W analizie procesu spalania wykorzystany został model mieszania paliwa z tlenem. Zakłada on, że wielkoskalowe zjawiska konwekcji i promieniowania są obliczane bezpośrednio, natomiast procesy o niewielkim wymiarze i krótkim czasie trwania muszą być określone na zasadzie przybliżenia. Zakłada on także, że proces spalania jest limitowany pod względem mieszania się substratów oraz, że szybkość reakcji paliwa z tlenem jest nieskończenie duża, co oznacza, że nie istnieje możliwość jednoczesnego występowania w mieszaninie zarówno tlenu jak i paliwa. W związku z tym we wszystkich elementach przestrzeni mogą być opisywane poszczególne frakcje wypełniające je mieszaniny gazowej jako funkcja parametru  $Z(x,t)$ .

Proces spalania opisuje ogólna reakcja:



Wartości  $v_i$  są współczynnikami stechiometrycznymi ogólnej reakcji spalania paliwa „F” w tlenie „O” dającej produkt „P”. Parametr  $Z$  definiowany jest jako:

$$Z = \frac{sY_F - (Y_O - Y_O^\infty)}{sY_F^I + Y_O^\infty} \quad (3.6)$$

przy czym:

$$s = \frac{v_O M_O}{v_F M_F} \quad (3.7)$$

gdzie:

$Y_O^\infty$  - udział masowy tlenu w otaczającym powietrzu,

$Y_F^I$  - udział masowy paliwa w strumieniu paliwa,

$M_O$  – masa molowa tlenu,

$M_F$  – masa molowa paliwa,

$Y_O$  - udział masowy tlenu w mieszaninie,

$Y_F$  - udział masowy paliwa w mieszaninie.

Wartość  $Z$  waha się pomiędzy  $Z=1$  w rejonie, w którym występuje wyłącznie paliwo do  $Z=0$  w miejscach gdzie występuje wyłącznie czyste powietrze ( $Y_O^\infty$ ) [5].

## Model promieniowania ciepłego

Model promieniowania ciepłego w programie FDS oparty został na równaniu ruchu ciepła na drodze promieniowania dla gazu rozpraszającego się (ang. - scattering gas):

$$s \cdot \nabla I_\lambda(x,s) = [\kappa(x,\lambda) + \sigma(x,\lambda)]I(x,s) + B(x,\lambda) + \frac{\sigma(x,\lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s,s')I_\lambda(x,s')d\Omega' \quad (3.8)$$

gdzie:

$I_\lambda$  - intensywność promieniowania o długości fali  $\lambda$ ,

$B(x,\lambda)$  - emisyjność źródła,

$s$  – jednostkowy wektor normalny,



$\sigma(x, \lambda)$  - lokalny współczynnik rozrzutu,

$\kappa(x, \lambda)$  - lokalny współczynnik absorpcji [5].

Prawa strona równania (4.9) opisuje zjawisko napływu gazu z różnych kierunków. Przy założeniu braku rozpraszania się gazu równanie (4.9) przyjmuje postać:

$$s \cdot \nabla I_n(x, s) = \kappa_n(x)[I_{b,n}(x) - I(x, s)] \quad (3.9)$$

W praktyce spektrum promieniowania jest dzielone na odpowiednio wąskie pasma, z których każde analizowane jest za pomocą równania (4.10), które dla pojedynczego pasma ma postać:

$$s \cdot \nabla I_n(x, s) = \kappa_n(x)[I_{b,n}(x) - I(x, s)], n = 1 \dots N \quad (3.10)$$

gdzie:

$I_n$  - intensywność promieniowania pasma  $n$ ,

$I_b(x)$  - człon źródłowy pochodzący z funkcji Plancka,

$\kappa_n$  - odpowiedni dla pasma  $n$  współczynnik absorpcji.

Człon źródłowy może być wówczas zapisany jako:

$$I_{b,n} = F_n(\lambda_{\min}, \lambda_{\max}) \sigma T^4 / \pi \quad (3.11)$$

gdzie:

$\sigma$  - stała Stefana-Boltzmannna.

Po wykonaniu obliczeń dla poszczególnych pasm następuje ich sumowanie zgodnie ze wzorem [5]:

$$I(x, s) = \sum_{n=1}^N I_n(x, s). \quad (3.12)$$

#### 4. Wyniki symulacji

W celu analizy warunków panujących w garażu przy pracy instalacji w trybie wentylacji bytowej oraz pożarowej, przeprowadzono następujące symulacje (tabela 1):

Scenariusz	Nazwa symulacji	Scenariusz	Podstawowe założenia
PA	SPNT_gar_1_1	Pożar PA w strefie detekcji dymu „A”	Punkt 5.1
PB	SPNT_gar_2_1	Pożar PB w strefie detekcji dymu „B”	Punkt 5.2

Tabela 1. Wykaz przeprowadzonych symulacji.

W tabelach 2 – 5 przedstawiono wyniki przeprowadzonych symulacji.

Rozkład przewidywanej temperatury na przejściach ewakuacyjnych, przy instalacji pracującej w trybie wentylacji pożarowej, pokazano na rzutach poziomych, na wysokości 1,8 m [3] od poziomu posadzki w kolejnych sekundach od momentu rozpoczęcia pożaru.

Rozkład przewidywanego zasięgu widzialności na przejściach ewakuacyjnych, przy instalacji pracującej w trybie wentylacji pożarowej, pokazano na rzutach poziomych, na wysokości 1,8 m od poziomu posadzki [3], w kolejnych sekundach od momentu rozpoczęcia pożaru.

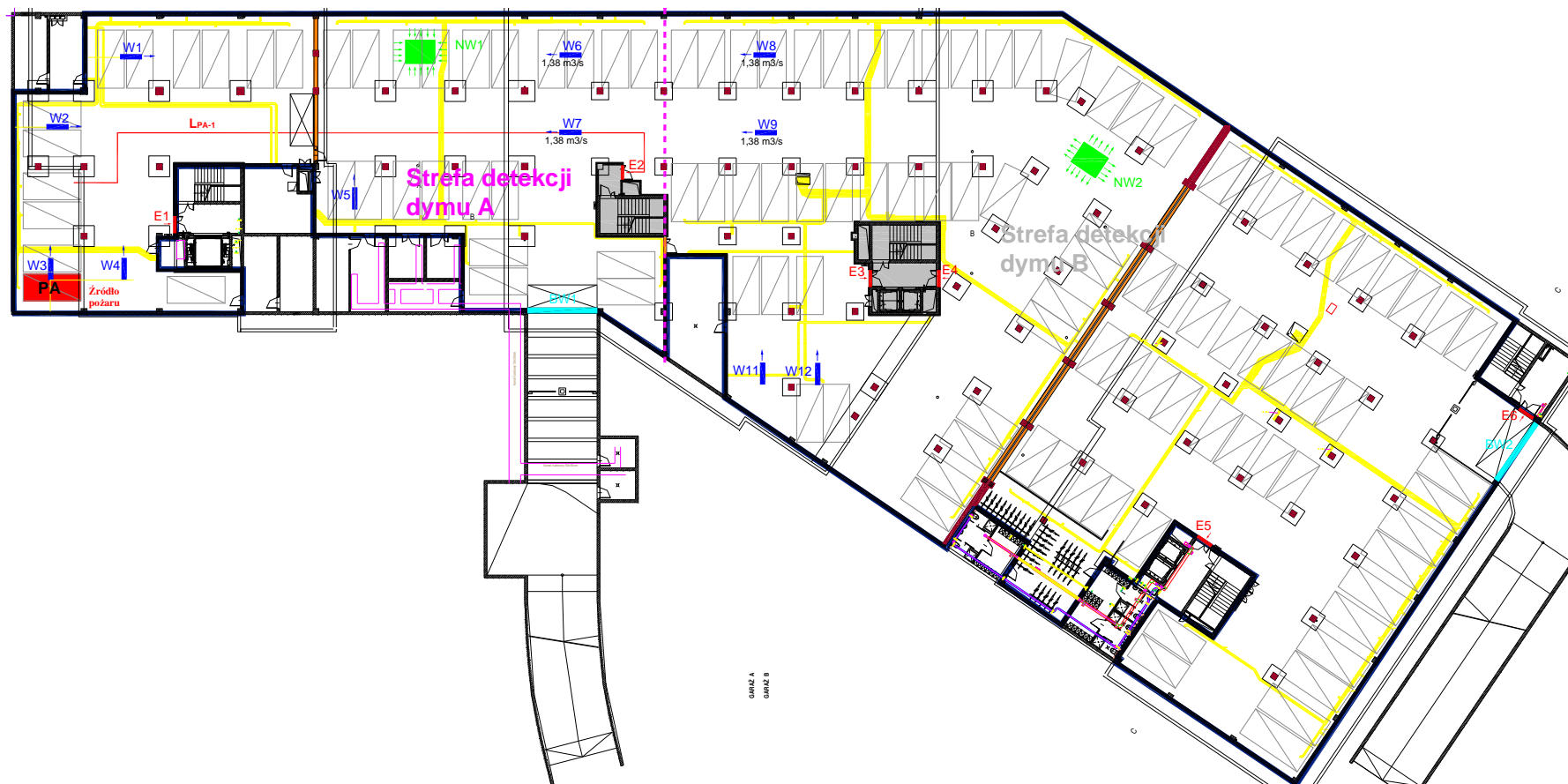
W punkcie 5.3, na rysunku 6 przedstawiono rozkład przewidywanej, chwilowej, maksymalnej temperatury pod stropem (bezpośrednio nad pożarem „PA”) w czasie do 15 minut od momentu rozpoczęcia pożaru.

W punkcie 5.4, na rysunku 7, przedstawiono rozkład przewidywanej maksymalnej temperatury na poziomie zamontowania wentylatorów strumieniowych (bezpośrednio nad pożarem „PA”) w czasie do 15 minut od momentu rozpoczęcia pożaru.

W punkcie 5.5, na rysunku 8 przedstawiono rozkład przewidywanej maksymalnej temperatury dymu na wentylatorach oddymiających-wyciągowych (pożar bezpośrednio przy kracie wyciągowej „NW1”- symulacja „SPNT\_gar\_PW\_1”) w czasie do 15 minut od momentu rozpoczęcia pożaru.

## 5.1 Wyniki symulacji „PA” przeprowadzonej dla instalacji pracującej w trybie wentylacji pożarowej

Szczegółowy opis pracy systemu oddymiania dla przyjętego w symulacji „PA” pożaru zlokalizowanego w garażu na kondygnacji „-1” w strefie detekcji dymu „A”, przedstawiono w punkcie 3.2 oraz na rysunku 4. Wentylator strumieniowy W3 został w tym scenariuszu uznany za niepracujący z powodu możliwości wykluczenia go przez pożar.



Rysunek 4. Praca instalacji w trybie wentylacji oddymiającej. Pożar „PA” w strefie detekcji dymu „A”.

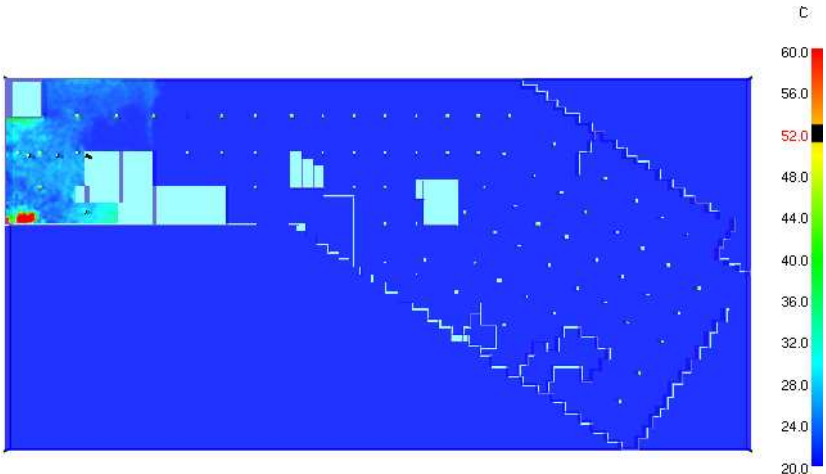
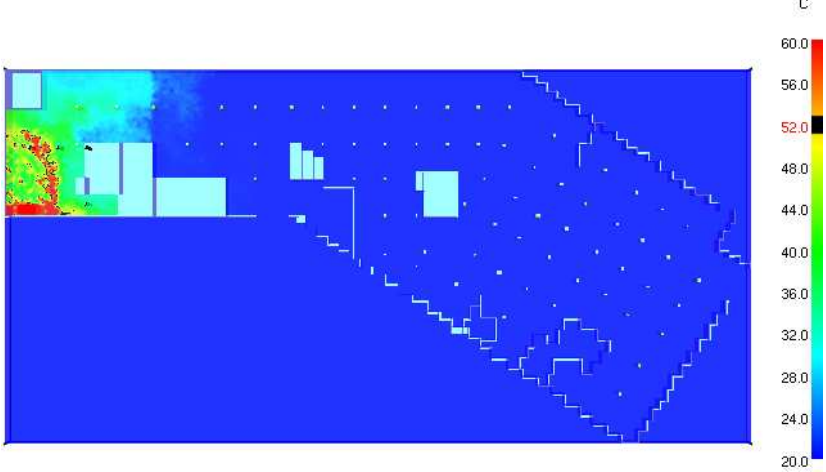
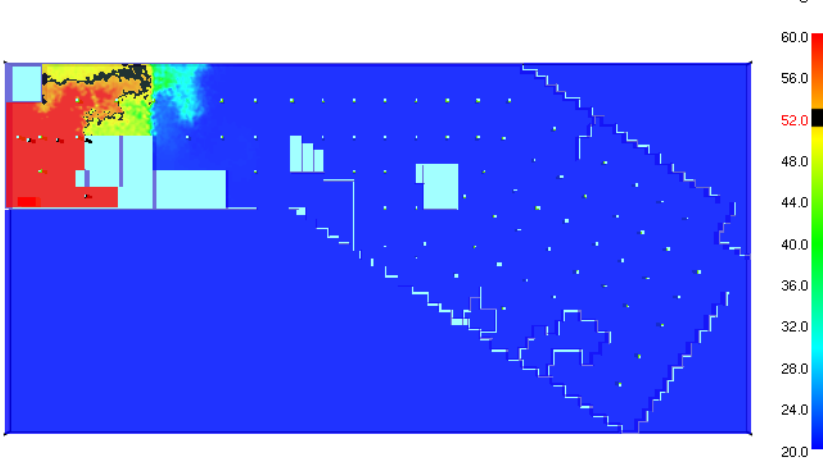
Tabela 2. Symulacja PA	
Czas	Rozkład temperatury na wysokości 1,8 m od posadzki
T=190s	 <p>Temperature distribution map at T=190s. The map shows a rectangular area with a grid of points. The color scale ranges from 20.0 (blue) to 60.0 (red). The temperature is highest (red/orange) in the top-left corner and decreases towards the bottom-right corner.</p>
T=360s	 <p>Temperature distribution map at T=360s. The map shows a rectangular area with a grid of points. The color scale ranges from 20.0 (blue) to 60.0 (red). The temperature is highest (red/orange) in the top-left corner and decreases towards the bottom-right corner.</p>
T=600s	 <p>Temperature distribution map at T=600s. The map shows a rectangular area with a grid of points. The color scale ranges from 20.0 (blue) to 60.0 (red). The temperature is highest (red/orange) in the top-left corner and decreases towards the bottom-right corner.</p>

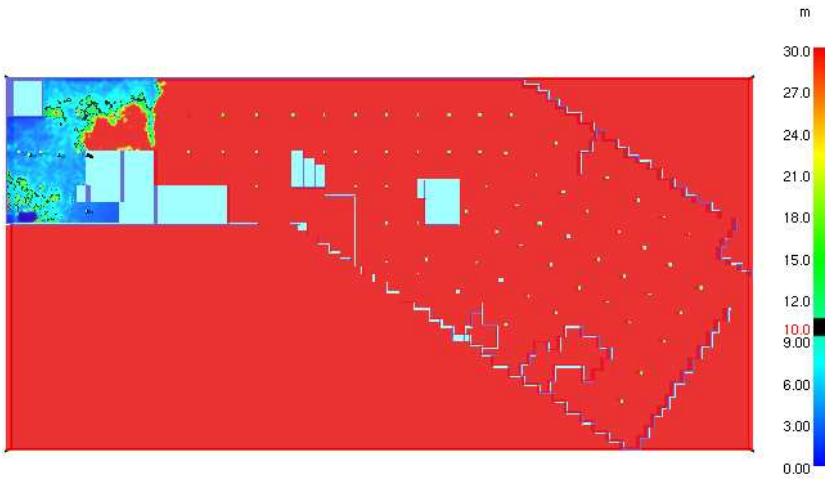
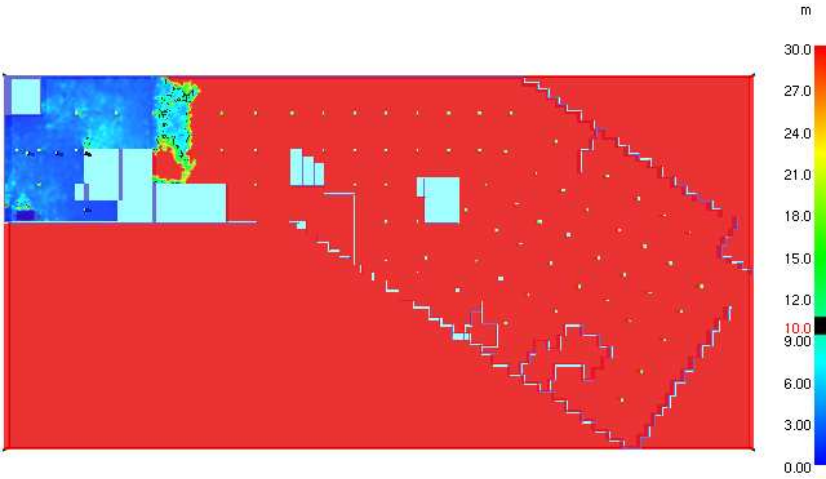
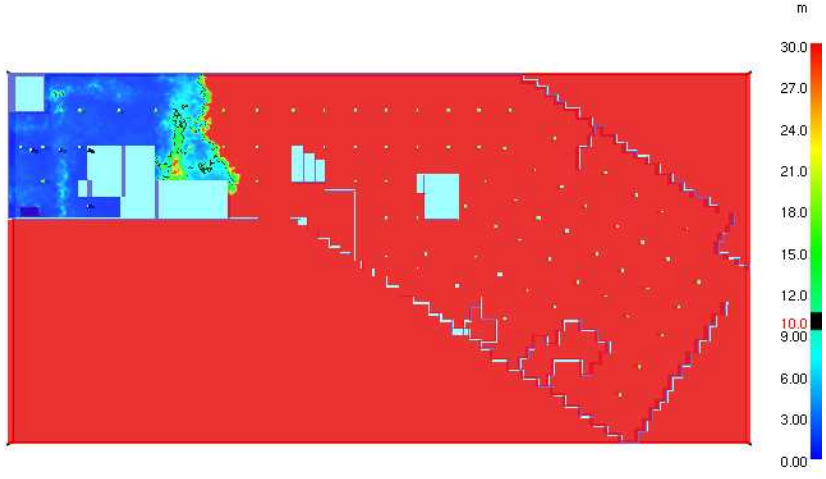
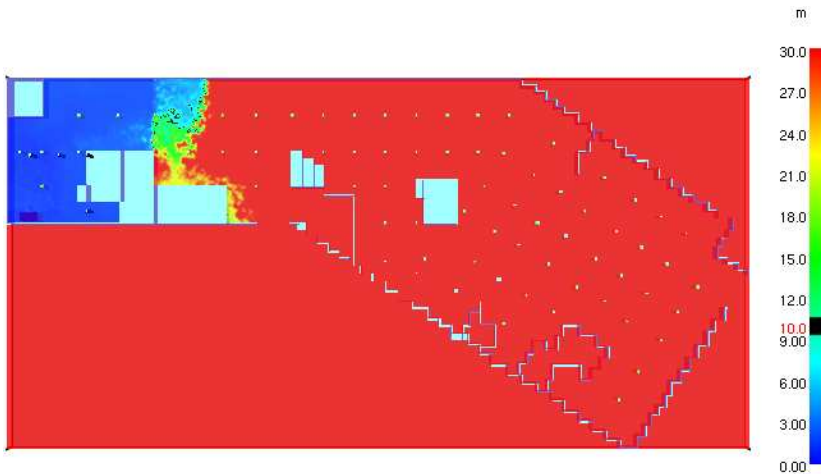
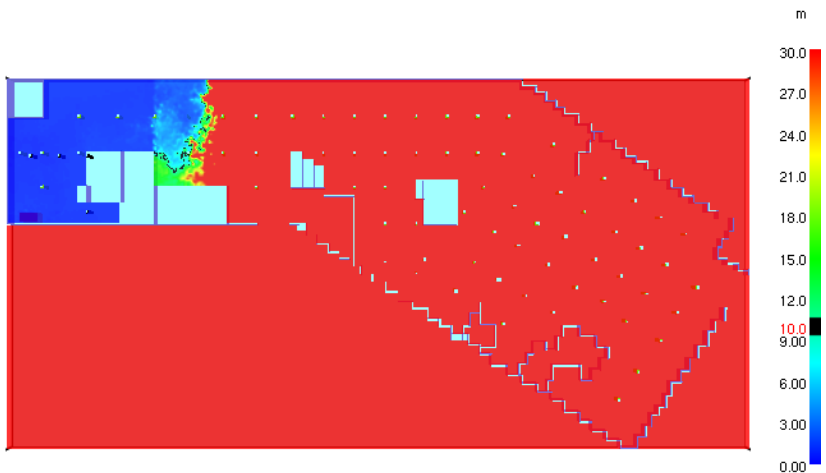
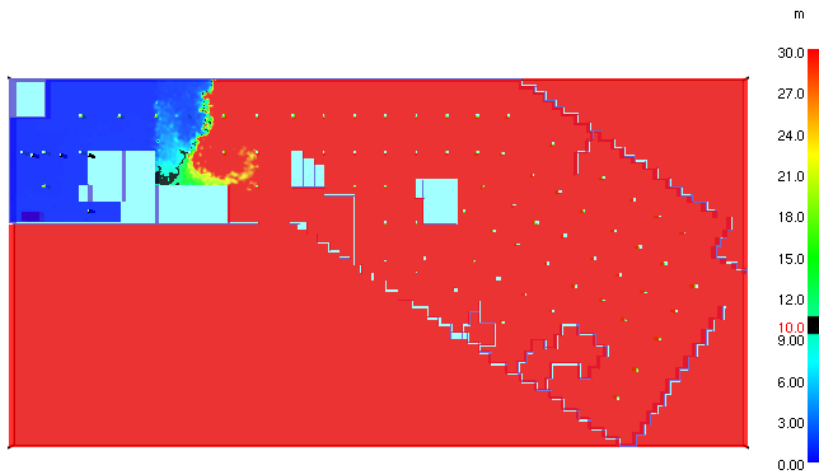
Tabela 3. Symulacja PA	
Czas	Rozkład zasięgu widzialności na wysokości 1,8 m od posadzki
T=190s	 <p>Map showing the distribution of visibility range at T=190s. The map is a grid with a color scale from 0.00 to 30.00 meters. The scale is indicated by a vertical color bar on the right, with values: 0.00, 3.00, 6.00, 9.00, 10.00, 12.00, 15.00, 18.00, 21.00, 24.00, 27.00, 30.00. The map shows a large red area (0.00m) and a smaller blue area (30.00m) in the top left corner.</p>
T=240s	 <p>Map showing the distribution of visibility range at T=240s. The map is a grid with a color scale from 0.00 to 30.00 meters. The scale is indicated by a vertical color bar on the right, with values: 0.00, 3.00, 6.00, 9.00, 10.00, 12.00, 15.00, 18.00, 21.00, 24.00, 27.00, 30.00. The map shows a large red area (0.00m) and a smaller blue area (30.00m) in the top left corner.</p>
T=300s	 <p>Map showing the distribution of visibility range at T=300s. The map is a grid with a color scale from 0.00 to 30.00 meters. The scale is indicated by a vertical color bar on the right, with values: 0.00, 3.00, 6.00, 9.00, 10.00, 12.00, 15.00, 18.00, 21.00, 24.00, 27.00, 30.00. The map shows a large red area (0.00m) and a smaller blue area (30.00m) in the top left corner.</p>

Tabela 3. Symulacja PA	
Czas	Rozkład zasięgu widzialności na wysokości 1,8 m od posadzki
T=360s	 <p>Map showing the distribution of visibility range at T=360s. The map is a grid with a color scale from 0.00 to 30.00 meters. The scale is indicated by a vertical color bar on the right, with values: 0.00, 3.00, 6.00, 9.00, 10.00, 12.00, 15.00, 18.00, 21.00, 24.00, 27.00, 30.00. The map shows a large red area (low visibility) and a smaller blue area (high visibility) in the top left corner.</p>
T=480s	 <p>Map showing the distribution of visibility range at T=480s. The map is a grid with a color scale from 0.00 to 30.00 meters. The scale is indicated by a vertical color bar on the right, with values: 0.00, 3.00, 6.00, 9.00, 10.00, 12.00, 15.00, 18.00, 21.00, 24.00, 27.00, 30.00. The map shows a large red area (low visibility) and a smaller blue area (high visibility) in the top left corner.</p>
T=600s	 <p>Map showing the distribution of visibility range at T=600s. The map is a grid with a color scale from 0.00 to 30.00 meters. The scale is indicated by a vertical color bar on the right, with values: 0.00, 3.00, 6.00, 9.00, 10.00, 12.00, 15.00, 18.00, 21.00, 24.00, 27.00, 30.00. The map shows a large red area (low visibility) and a smaller blue area (high visibility) in the top left corner.</p>



## 5.2 Wyniki symulacji „PB” przeprowadzonej dla instalacji pracującej w trybie wentylacji pożarowej

Szczegółowy opis pracy systemu oddymiania dla przyjętego w symulacji „PB” pożaru zlokalizowanego w garażu na kondygnacji „-1” w strefie detekcji dymu „B”, przedstawiono w punkcie 3.2 oraz na rysunku 5.



Rysunek 5. Praca instalacji w trybie wentylacji oddymiającej. Pożar „PB” w strefie detekcji dymu „B”.



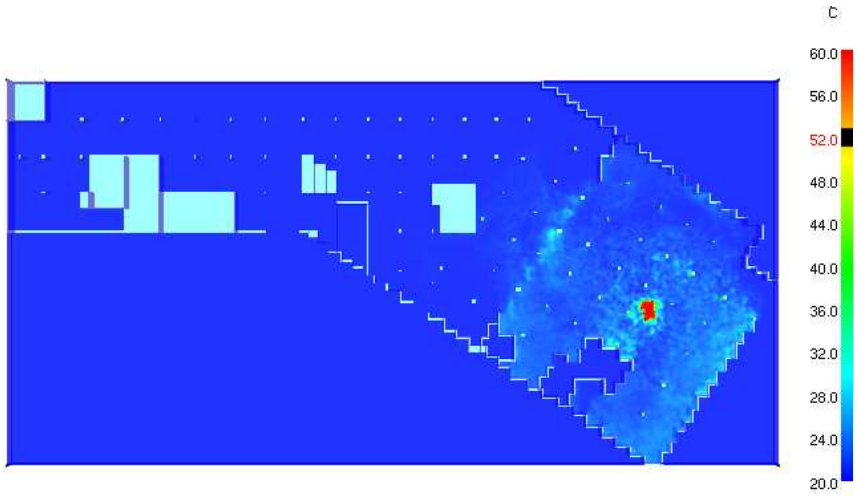
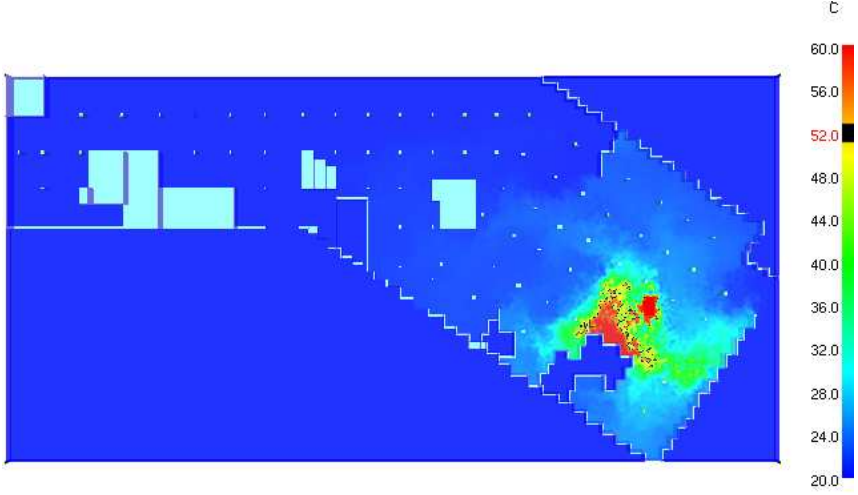
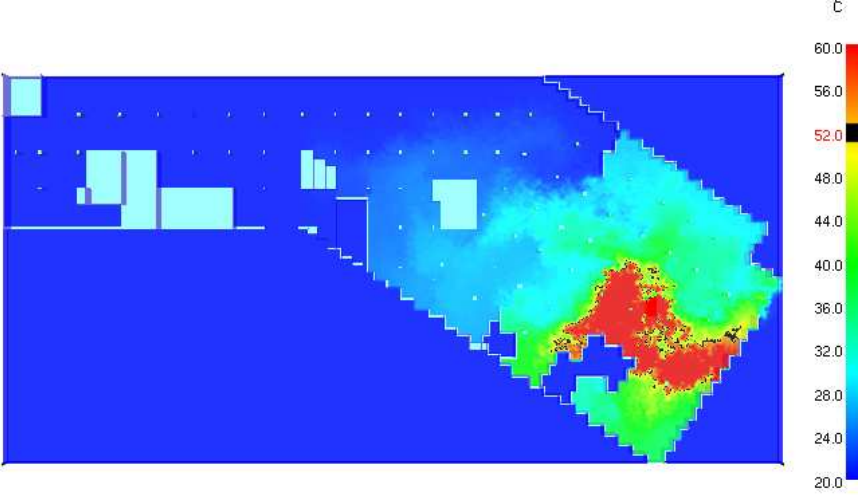
Tabela 4. Symulacja PB	
Czas	Rozkład temperatury na wysokości 1,8 m od posadzki
T=250s	 <p>Temperature distribution map at T=250s. The map shows a fire source on the right side of the room, with a color scale ranging from 20.0°C (blue) to 60.0°C (red). The fire is concentrated in a small area, with temperatures reaching up to 52.0°C. The rest of the room is relatively cool, with temperatures mostly below 28.0°C.</p>
T=360s	 <p>Temperature distribution map at T=360s. The fire has spread slightly more, with a larger area of high temperature (red and yellow) visible. The color scale remains the same, ranging from 20.0°C to 60.0°C. The fire is still concentrated on the right side of the room.</p>
T=600s	 <p>Temperature distribution map at T=600s. The fire has spread significantly, covering a large portion of the right side of the room. The color scale remains the same, ranging from 20.0°C to 60.0°C. The fire is still concentrated on the right side of the room.</p>

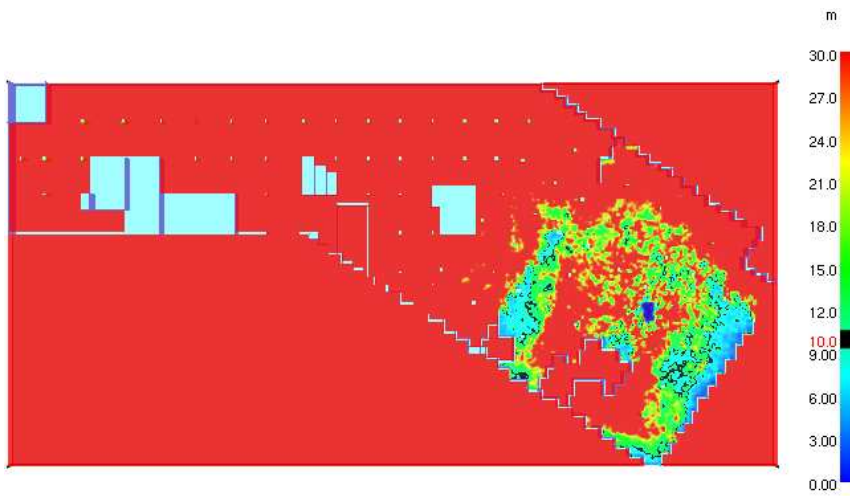
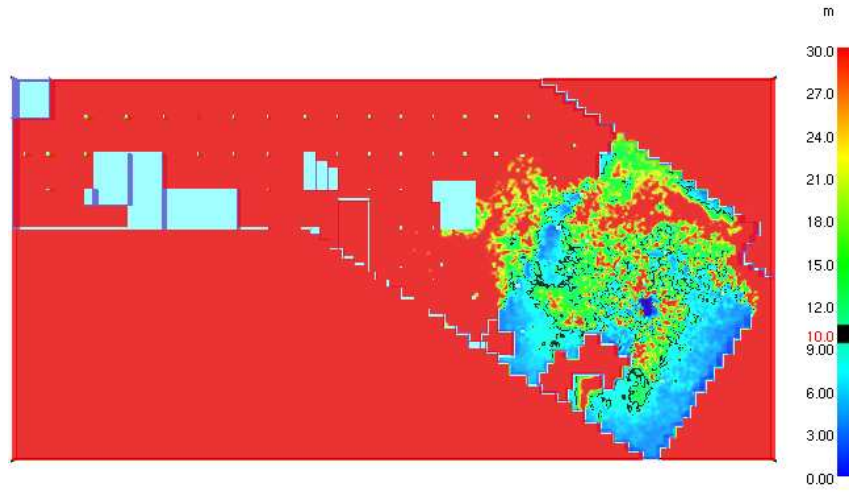
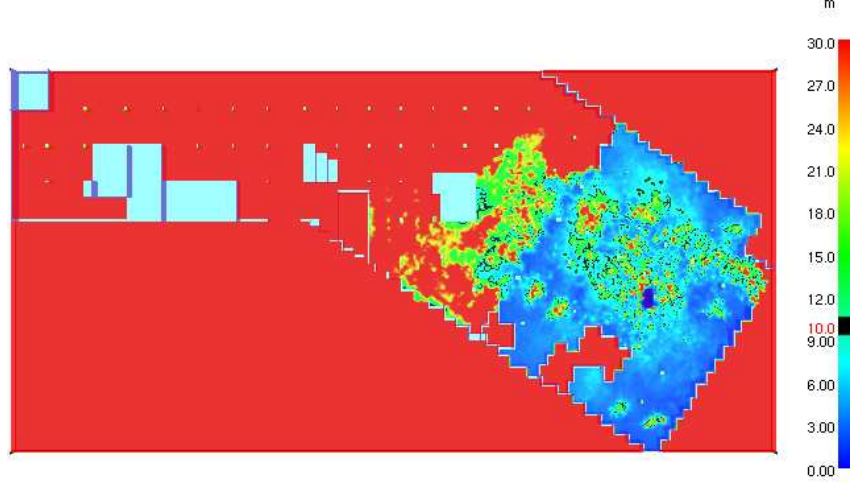
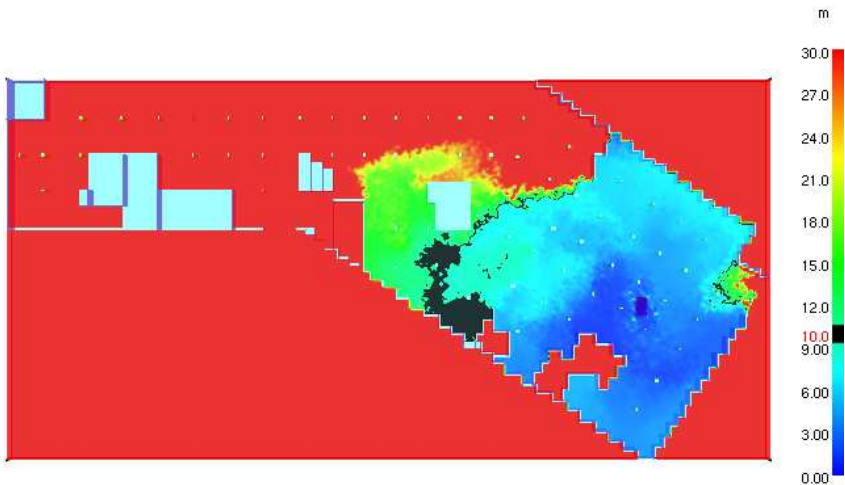
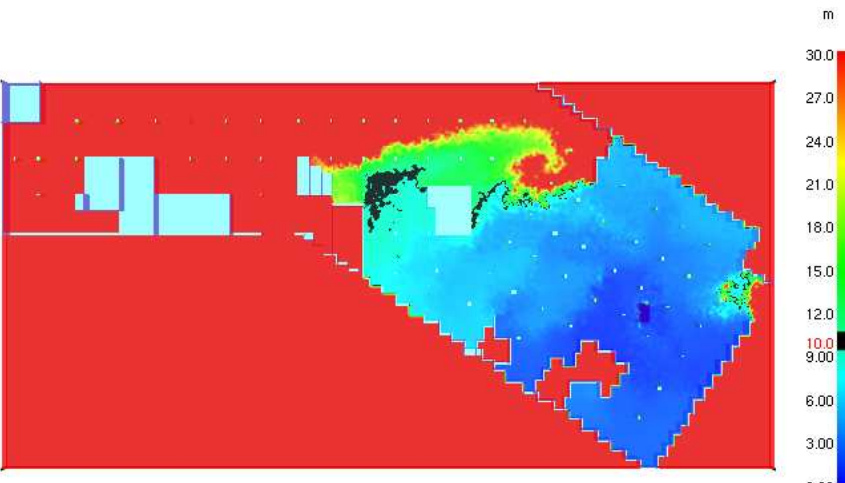
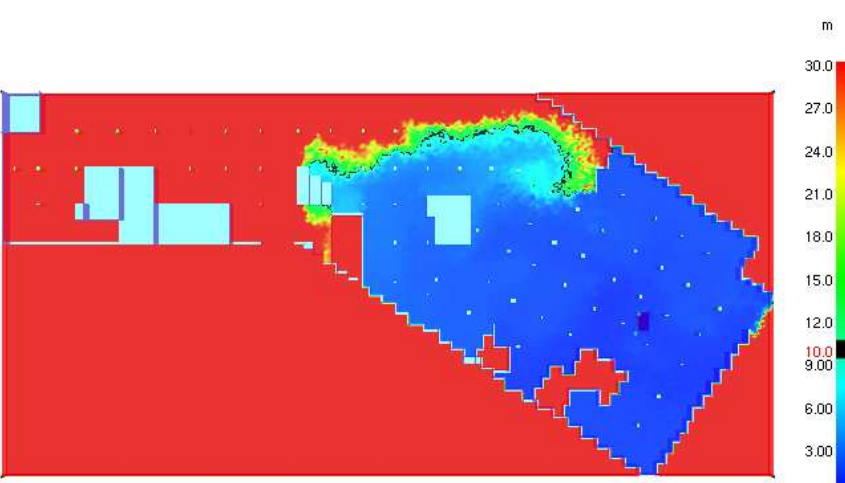
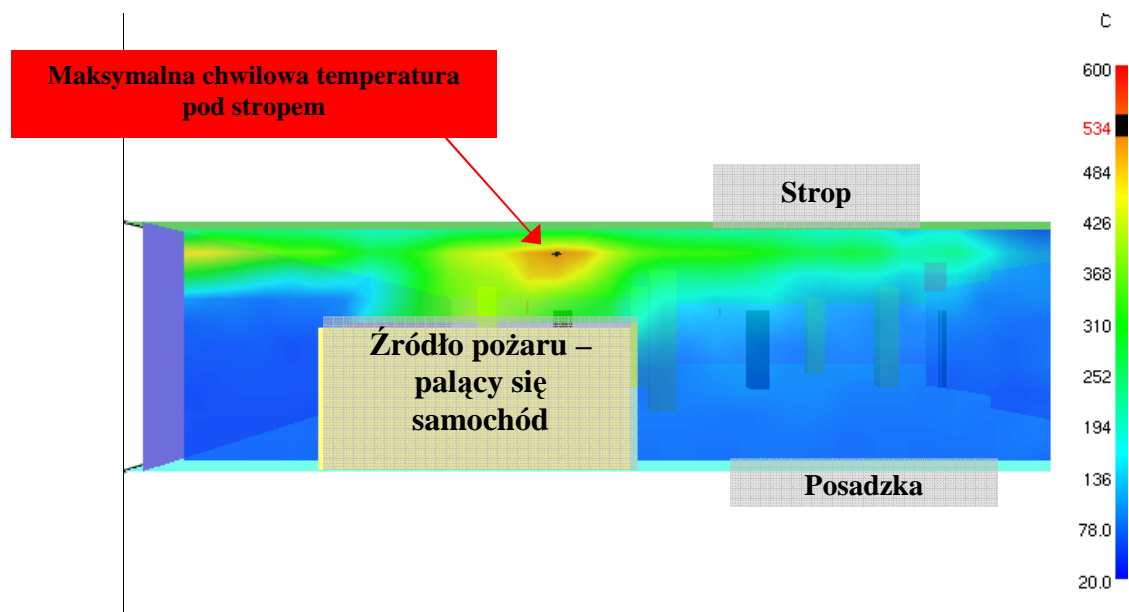
Tabela 5. Symulacja PB	
Czas	Rozkład zasięgu widzialności na wysokości 1,8 m od posadzki
T=200s	 <p>Diagram showing the distribution of visibility range at T=200s. The map displays a red area representing the visible range, with a color scale on the right indicating distance in meters (m) from 0.00 to 30.00. The scale is: 0.00, 3.00, 6.00, 9.00, 10.00, 12.0, 15.0, 18.0, 21.0, 24.0, 27.0, 30.0. The visible range is concentrated in the upper right quadrant, with a peak value of 30.00 m.</p>
T=250s	 <p>Diagram showing the distribution of visibility range at T=250s. The map displays a red area representing the visible range, with a color scale on the right indicating distance in meters (m) from 0.00 to 30.00. The scale is: 0.00, 3.00, 6.00, 9.00, 10.00, 12.0, 15.0, 18.0, 21.0, 24.0, 27.0, 30.0. The visible range is concentrated in the upper right quadrant, with a peak value of 30.00 m.</p>
T=300s	 <p>Diagram showing the distribution of visibility range at T=300s. The map displays a red area representing the visible range, with a color scale on the right indicating distance in meters (m) from 0.00 to 30.00. The scale is: 0.00, 3.00, 6.00, 9.00, 10.00, 12.0, 15.0, 18.0, 21.0, 24.0, 27.0, 30.0. The visible range is concentrated in the upper right quadrant, with a peak value of 30.00 m.</p>

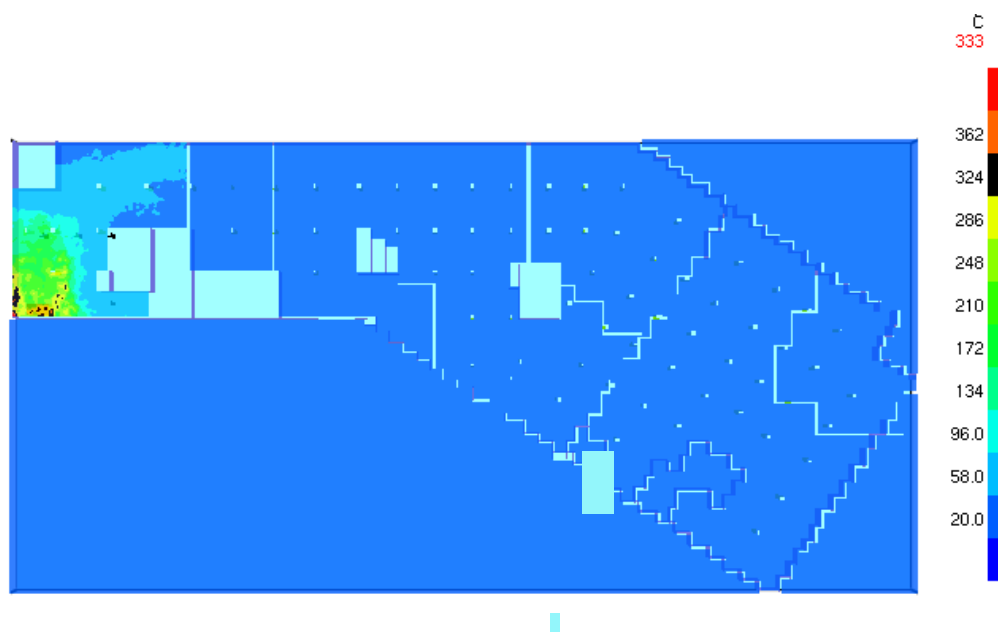
Tabela 5. Symulacja PB	
Czas	Rozkład zasięgu widzialności na wysokości 1,8 m od posadzki
T=360s	
T=420s	
T=600s	

### 5.3 Przewidywana temperatura pod stropem garażu dla scenariusza pożaru „PA”



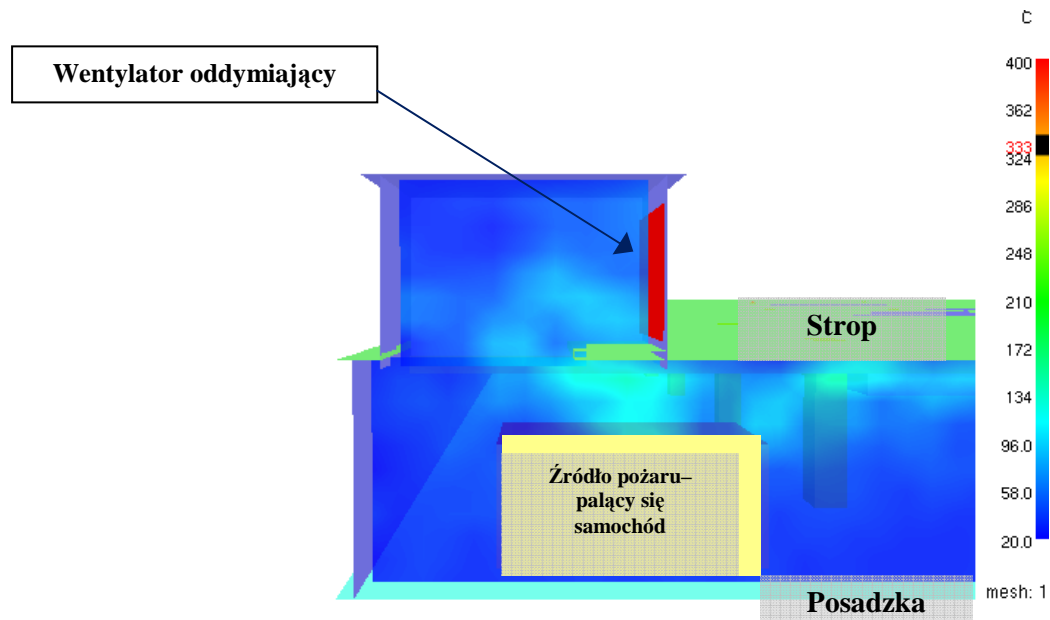
Rys.6. Przewidywana maksymalna chwilowa temperatura pod stropem garażu w czasie do 15 min. od rozpoczęcia pożaru [°C] – wynik symulacji „PA”.

### 5.4 Przewidywana temperatura w płaszczyźnie montażu wentylatorów strumieniowych



Rys. 7. Przewidywana temperatura w płaszczyźnie montażu wentylatorów strumieniowych w czasie 15 min. od rozpoczęcia pożaru [°C] – wynik symulacji „PA”.

## 5.5 Przewidywana maksymalna temperatura dymu na wentylatorach oddymiających - wyciągowych



Rys.8. Przewidywana maksymalna temperatura dymu na wentylatorach oddymiających - wyciągowych w czasie do 15 min. od rozpoczęcia pożaru [°C] – wynik symulacji „SPNT\_gar\_PW\_1”.

## 5. Wnioski i podsumowanie

1. Analiza przewidywanego rozkładu temperatury na wysokości do 1,8 m od posadzki wykazała, iż dopuszczalna wartość temperatury 60°C (52°C wg symulacji) na przejściach ewakuacyjnych i w pobliżu wyjść ewakuacyjnych, w analizowanych scenariuszach pożarowych, w czasie przewidzianym na ewakuację, nie została przekroczona, za wyjątkiem obszaru sąsiadującego ze źródłem pożaru.
2. Analiza rozkładu zasięgu widzialności na wyznaczonych przejściach ewakuacyjnych, na wysokości do 1,8 m od posadzki wykazała, iż przekroczenie dopuszczalnej wartości 10 m, przy wyjściach ewakuacyjnych przewidzianych do ewakuacji w poszczególnych scenariuszach pożarowych, występuje po czasie przedstawionym w poniższych tabelach:

Przewidywane czasy ewakuacji i przekroczenia granicznego zasięgu widzialności dla osób znajdujących się w pobliżu źródła pożaru i rozpoczynających ewakuację po czasie dla „pierwszej osoby”			
Dojście do wyjścia ewakuacyjnego	PA: 190 s	Przekroczenie granicznego zasięgu widzialności przy wyjściu ewakuacyjnym	PA: > 600 s
	PB: -		PB: -

Przewidywane czasy ewakuacji i przekroczenia granicznego zasięgu widzialności dla osób rozpoczynających ewakuację po czasie dla „99% osób” dla najbardziej niekorzystnych tras przejść ewakuacyjnych w poszczególnych scenariuszach			
Dojście do wyjścia ewakuacyjnego	PA: -	Przekroczenie granicznego zasięgu widzialności przy wyjściu ewakuacyjnym	PA: -
	PB: 250 s		PB: > 420 s

Porównanie przewidywanego czasu poszczególnych etapów ewakuacji i przewidywanego czasu przekroczenia dopuszczalnych wartości zasięgu widzialności dla tych etapów wykazało, iż przekroczenie to występuje, w każdym z rozpatrywanych scenariuszy pożarowych, po czasie dłuższym niż przewidziany czas ewakuacji dla poszczególnych jej etapów.

Oznacza to, iż dla przyjętych założeń, zgodnie z §270 „Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 marca 2009 r. zmieniającego rozporządzenie w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie”, projektowany system wentylacji pożarowej usuwa dym z intensywnością zapewniającą, że w przewidywanym czasie potrzebnym do ewakuacji ludzi na chronionych przejściach ewakuacyjnych, nie wystąpi zadymienie lub temperatura uniemożliwiająca bezpieczną ewakuację oraz ma stały dopływ powietrza zewnętrznego uzupełniającego braki tego powietrza w wyniku jego wypływu wraz z dymem.

3. Analiza przewidywanego rozkładu maksymalnej temperatury dymu na wysokości montażu wentylatorów strumieniowych, dla przyjętych założeń, w czasie do 15 minut od rozpoczęcia pożaru wykazała, iż we wszystkich z analizowanych scenariuszy pożarowych, temperatura przekraczająca 400°C oddziałuje na nie

więcej niż jeden wentylator strumieniowy. We wszystkich wykonanych analizach uwzględniono brak pracy wentylatora wykluczonego przez temperaturę przekraczającą 400°C.

4. W analizach dla założonych scenariuszy pożarowych, przeprowadzonych dla przyjętych założeń, uzyskano:
  - a. maksymalną chwilową temperaturę powietrza pod stropem w czasie do 15 minut od momentu rozpoczęcia pożaru nie przekraczającą 534°C (z uwzględnieniem marginesu bezpieczeństwa 20%, temperatura ta może wynosić ok. 641°C),
  - b. przewidywaną maksymalną temperaturę dymu oddziałującą na pracujące wentylatory strumieniowe (z pominięciem wentylatora wykluczonego przez pożar) w czasie do 15 minut od momentu rozpoczęcia pożaru, z uwzględnieniem marginesu bezpieczeństwa 20%, nie przekraczającą 400°C.
  - c. przewidywaną maksymalną temperaturę dymu oddziałującą na wentylatory oddymiające – wyciągowe, zlokalizowane zgodnie z założeniami opisanymi w punkcie 3, w czasie do 15 minut od momentu rozpoczęcia pożaru, z uwzględnieniem marginesu bezpieczeństwa 20%, nie przekraczającą 400°C.



## 7. Literatura

1. PD 7974 -6: 2004 The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings. Part6: Human Factors: Life safety strategies –Occupant evacuation, behaviour and condition (SUB-system 6). [*Zastosowanie zasad inżynierii bezpieczeństwa pożarowego do projektowania systemów zabezpieczeń przeciwpożarowych w obiektach budowlanych. Część 6: Czynniki ludzkie: zapewnienie bezpieczeństwa – ewakuacja użytkowników, zachowanie i warunki.*]
2. NFPA 502. "Standard for Road Tunnels, Bridges and Other Limited Access Highways" 2001 Edition. [*Norma dla tuneli drogowych, mostów i innych obiektów drogowych.*]
3. Ratajczak D. "Rozwiązania zamienne w ochronie przeciwpożarowej" Ochrona Przeciwpożarowa 3/2005.
4. NFPA 204, "Standard for Smoke and Heat Venting" 2002 Edition. [*Norma dla systemów usuwania ciepła i dymu.*]
5. Fire Dynamics Simulator Version 4 – Technical Reference Guide, NIST 2004. [*Program do symulacji pożarów. Wersja 4 – Instrukcja techniczna, Narodowy Instytut Standardów i Technologii 2004.*]
6. Fire Dynamics Simulator Version 4 – Users Guide, NIST 2004. [*Program do symulacji pożarów. Wersja 4 – Przewodnik użytkownika, Narodowy Instytut Standardów i Technologii 2004.*]
7. Jansens M. "Heat release rate of motor vehicles" Fifth International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, Luxemburg October 2004. [*"Moc pożarów dla pojazdów silnikowych" Piąta Międzynarodowa Konferencja na temat przepisów i metod projektowania dla systemów bezpieczeństwa pożarowego, Luksemburg, Październik 2004.*]
8. Bukowski R. "The basis for egress provisions in U.S. building codes" NIST Building and Fire Research Laboratory, Gaithersburg, Maryland 20899 USA. [*"Podstawy wymagań ewakuacyjnych w przepisach amerykańskich" Narodowy Instytut Standardów i Technologii, Laboratorium Badań Ogniowych, USA.*]
9. Verification & Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 7: Fire Dynamics Simulator. US Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research (RES), May 2007.



Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety  
Lund University

# *Diploma*

*certifying that*

*Dorota Brzezinska*

*has attended and successfully completed the  
requirements for the graduate course*

*Simulation of Fires in Enclosures*

*held January to June 2009  
and corresponding to 7.5 ECTS credits*

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Patrick van Hees", written over a horizontal line.

Prof. Patrick van Hees, Course Coordinator