

## POLITECHNIKA POZNAŃSKA

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

INSTYTUT INŻYNIERII ŚRODOWISKA Zakład Ogrzewnictwa, Klimatyzacji i Ochrony Powietrza

## mgr inż. Marek Stojek

## Ocena efektywności współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej

ROZPRAWA DOKTORSKA

Promotor: prof. dr hab. inż. Edward Szczechowiak

Poznań, 2014

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania mojemu **Promotorowi Panu Profesorowi dr hab.** inż. Edwardowi Szczechowiakowi za trud włożony w pomoc przy realizacji niniejszej rozprawy. Serdecznie dziękuję również za wsparcie, poświęcony mi czas, cierpliwość, wyrozumiałość oraz konstruktywne uwagi i porady.

Dziękuję Panu Profesorowi dr hab. inż. Januszowi Wojtkowiakowi za cenne i krytyczne uwagi na temat mojej pracy. Kierownikowi studiów doktoranckich, Panu Profesorowi dr hab. arch. Zbigniewowi Bromberkowi dziękuję serdecznie za pomoc w spełnieniu wszystkich formalnych wymagań niezbędnych do zakończenia studiów doktoranckich.

Za wyrozumiałość i wsparcie dziękuję mojej Rodzinie.

Wszystkim Pracownikom oraz Współpracownikom z Zakładu Ogrzewnictwa, Klimatyzacji i Ochrony Powietrza Politechniki Poznańskiej dziękuję za okazaną pomoc.

Marek Stojek

Marek Stojek Ocena efektywności współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej

#### STRESZCZENIE

Jednym z podstawowych zadań współczesnej inżynierii w budownictwie jest zapewnienie użytkownikom komfortu i bezpieczeństwa użytkowania. W zakresie bezpieczeństwa istotne jest bezpieczeństwo pożarowe osiągnięte przy racjonalnych nakładach inwestycyjnych.

Niniejsza rozprawa dotyczy zwiększenia efektywności instalacji wentylacji oddymiania poprzez współpracę tej instalacji z instalacją mgły wodnej.

Podstawą osiągnięcia założonych celów są badania doświadczalne na odpowiednio wykonanym stanowisku, gdzie badano procesy zachodzące w czasie pożaru w pomieszczeniu z uwzględnieniem oddziaływania instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej. Budowa stanowiska badawczego, przebadanie wzajemnego współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej i mgły wodnej w warunkach pożarowych, a następnie opracowanie modelu numerycznego odwzorowującego podstawowe cechy obserwowanych procesów potwierdzają otrzymane wyniki i ich wiarygodność.

Analiza wyników badań doświadczalnych oraz obliczeń numerycznych umożliwiła przeprowadzenie próby ustalenia przez autora zależności skuteczności obniżenia temperatury w pomieszczeniach podczas pożaru - od parametrów mediów doprowadzanych tj. od strumienia powietrza kompensującego, strumienia masowego mgły wodnej oraz substancji usuwanych tj. strumienia masowego dymów i gazów pożarowych.

Nowym i istotnym wnioskiem, który znalazł potwierdzenie w analizach wyników badań, jest możliwość obniżenia wielkości strumienia powietrza kompensującego, strumienia usuwanych dymów i gazów pożarowych oraz klas odporności ogniowej elementów instalacji wentylacji oddymiającej dzięki zastosowaniu instalacji mgły wodnej.

Opierając się na wynikach niniejszej pracy oraz analizach numerycznych (CFD) procesów występujących w czasie pożaru, możliwe jest znalezienie optymalnych rozwiązań projektowych w zakresie współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej, instalacji mgły wodnej, procedur gwarantujących poprawę warunków ewakuacji oraz ograniczenie szkód wywołanych pożarem.

Marek Stojek

Assessment of possibilities of cooperation between smoke and heat exhaust ventilation and water mist installation in buildings.

#### SUMMARY

One of the basic goals in modern engineering is to provide an appropriate level of comfort and safety to people as well as stable conditions of fire safety in buildings taking into account optimal capital expenditure.

The dissertation relates to increasing effectiveness of smoke and heat exhaust ventilation system through its cooperation with water mist installation.

The mail goal could be achieved through experimental researches on a properly constructed research site where were investigated processes coming up during fires in rooms, considering interaction between smoke and heat exhaust ventilation system and water mist installation. The construction of a research site, testing of interaction between smoke and heat exhaust ventilation system and water mist installation in similar fire conditions then working up numeric model imitating features of phenomena confirm the results and their credibility.

The analyses of study results and numerical calculations allowed to settle by the author reliance between the effectiveness of lowering temperature in rooms during a fire and the media parameters supplied to the rooms i.e. mass flow rate of compensate air, mass flow rate of water mist and substances removed from the rooms i.e. mass flow rate of smoke and fire gases.

The conclusion reflected in results analyses is new and very important. it showed that it is possible to reduce the size of volume compensate air, volume smoke and fire gases and fire resistance class of elements of smoke and heat exhaust ventilation installation due to applying water mist installation.

The research findings as well as analyses of simulations computational fluid dynamic (CFD) processes occurring during a fire proved that it is possible to find optimal design solutions when considering interaction among smoke and heat exhaust ventilation system, water mist installation, organizational procedures assuring improvement of evacuation conditions and limitation of damages caused by fire.

## SPIS TREŚCI

SPIS RYSUNKÓW	7
SPIS TABLIC	. 10
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH DEFINICJI I TERMINÓW	. 11
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	. 12
1. WSTĘP	. 13
1.1. Instalacja wentylacji oddymiającej i instalacja mgły wodnej w ochronie przeciwpożarowej	. 13
1.2. Cel, zakres i tezy rozprawy doktorskiej	. 14
2. SYSTEMY I URZĄDZENIA PRZECIWPOŻAROWE W OBIEKTACH BUDOWLANYCH	. 16
2.1. Statystyki pożarów	. 16
2.2. Podstawowe zagrożenia pożarowe	. 21
2.3. Podstawowe cele ochrony przeciwpożarowej w budynkach	. 22
2.4. Koncepcja ochrony przeciwpożarowej	. 22
2.5. Techniczne środki zabezpieczenia przeciwpożarowego	. 24
2.5.1. Urządzenia przeciwpożarowe zapobiegające powstaniu pożaru	. 25
2.5.2. Urządzenia przeciwpożarowe wykrywające pożar	. 26
2.5.3. Urządzenia przeciwpożarowe sygnalizujące pożar	. 26
2.5.4. Urządzenia przeciwpożarowe zapewniające bezpieczną ewakuację	. 26
2.5.5. Gaśnicze urządzenia przeciwpożarowe	. 27
2.5.6. Urządzenia przeciwpożarowe ułatwiające akcję ratowniczo- gaśniczą	. 28
2.5.7. Wybrane przykłady współdziałania urządzeń przeciwpożarowych w budynkach	. 28
3. WARUNKI BEZPIECZNEJ EWAKUACJI Z BUDYNKU	. 33
3.1. Rozwój pożaru w pomieszczeniach i jego opis	. 33
3.2. Modele rozwoju pożaru	. 37
3.3. Przegląd wymagań zapewniających bezpieczną ewakuację	. 41
3.4. Metody zapewnienia warunków bezpiecznej ewakuacji	. 44
4. STAN WIEDZY W ZAKRESIE INSTALACJI WENTYLACJI POŻAROWEJ I MGŁY WODNEJ	. 48
4.1. Podstawowe zależności	. 48
4.2. Badania w rzeczywistej i zmniejszonej skali geometrycznej	. 57
4.3. Badania numeryczne	. 59
5. BADANIA EKSPERYMENTALNE NA STANOWISKU BADAWCZYM	. 62
5.1. Cel i program badań	. 62
5.2. Stanowisko badawcze	. 66
5.2.1. Założenia, obliczenia i skalowanie stanowiska badawczego	. 66
5.2.2. Budowa stanowiska badawczego	. 70
5.2.3. Zasady funkcjonowania stanowiska badawczego	. 76
5.2.4. Parametry paliwa użytego w badaniach	. 77
5.2.5. Parametry badanych pożarów	. 77
5.2.6. Parametry instalacji wentylacji oddymiającej	. 78
5.2.7. Parametry instalacji mgły wodnej	. 79
5.2.8. Parametry przyrządów pomiarowych	. 85
5.2.9. Rachunek błędów	. 85
5.3. Metodyka badań	. 87
5.4. Przebieg i wyniki badań	. 88
5.5. Analiza wyników badań	. 90
6. OBLICZENIA NUMERYCZNE	. 96
6.1. Model numeryczny zjawisk w komorze badawczej	. 96
6.1.1. Ogólny opis modelu	. 96
6.1.2. Metodyka obliczeń numerycznych	. 98

6.1.3. Oprogramowanie do obliczeń numerycznych	99
6.1.4. Założenia obliczeń numerycznych	99
6.1.5. Obliczenia numeryczne	. 101
6.1.6. Walidacja modelu	. 102
6.1.7. Dodatkowa walidacja modelu	. 104
6.2. Analiza wyników obliczeń numerycznych	. 105
6.3. Porównanie otrzymanych wyników	. 107
6.4. Odniesienie wyników do rzeczywistej skali geometrycznej	. 108
7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	. 114
7.1. Wnioski końcowe	. 114
7.2. Kierunki dalszych badań	. 115
8. LITERATURA	. 116
9. ZAŁĄCZNIKI	. 119
9.1. Załącznik 1. Właściwości fizykochemiczne	. 119
9.2. Załącznik 2. Wyniki badań eksperymentalnych	. 122
9.3. Załącznik 3. Przykładowa kopia pliku obliczeń numerycznych	. 127
9.4. Załącznik 4. Parametry płyt gipsowo-kartonowych	. 129

### **SPIS RYSUNKÓW**

Rys. 2.1. Liczba pożarów w obiektach użyteczności publicznej w Polsce w roku 2013	17
Rys. 2.2. Liczba pożarów w obiektach mieszkalnych w Polsce w roku 2013	17
Rys. 2.3. Liczba pożarów w obiektach produkcyjnych w Polsce w roku 2013	18
Rys. 2.4. Liczba pożarów w obiektach magazynowych w Polsce w roku 2013	18
<b>Rys. 2.5</b> . Przypuszczalne przyczyny pożarów w obiektach budowlanych w Polsce w roku 2013	19
<b>Rys. 2.6.</b> Przypuszczalne przyczyny pożarów w Niemczech w obiektach opieki nad osobami starszymi [9]	19
<b>Rys. 2.7</b> . Straty materialne powstałe w wyniku wystapienia pożarów w Niemczech [10].	20
<b>Rys. 2.8.</b> Pogladowe zestawienie strumieni objętości dymów i gazów pożarowych, które mogą powstać poć	lczas
pożaru w zależności od rodzaju materiału [11].	21
Rys. 2.9. Poglądowy podział celów ochrony przeciwpożarowej w budynku	22
Rys. 2.10. Poglądowy podział procedur projektowych	23
Rys. 2.11. Poglądowy wykres faz projektowania technicznych środków zabezpieczenia przeciwpożarow	wego
zorientowanych na cel i własności użytkowe	24
Rys. 2.12. Poglądowy podział elementów scenariusza pożarowego	29
Rys. 3.1. Czynniki niezbędne do wybuchu pożaru.	33
Rys. 3.2. Poglądowe zdjęcia przedstawiające szybkość rozwoju pożaru w pomieszczeniu	33
Rys. 3.3. Model wymiany energii i masy w trakcie pożaru w pomieszczeniu [29]	34
Rys. 3.4. Fazy rozwoju pożaru w pomieszczeniu w zależności od czasu	35
<b>Rys. 3.5.</b> Wykres przedstawiający fazy rozwoju pożaru i poglądową wielkość emisji gorących dymów i ga pożarowych w trakcie pożaru w pomieszczeniu w zależności od czasu	azów 36
<b>Rvs. 3.6.</b> Pogladowy wykres zmiany mocy pożaru w funkcji czasu	37
<b>Rys. 3.7.</b> Podział modeli rozwoju pożaru w pomieszczeniach	38
<b>Rys. 3.8.</b> Przykład iednostrefowy model pożaru	39
<b>Rys. 3.9.</b> Przykład wielostrefowego modelu pożaru	
<b>Rys. 3.10.</b> Przykład polowego modelu pożaru	40
<b>Rys. 3.11.</b> Pogladowy wykres reakcji systemów przeciwpożarowych oraz ewakuacji w funkcji czasu	
<b>Rys. 3.12.</b> Pożar w pomieszczeniu - warunki bezpiecznej ewakuacji	
<b>Rys. 3.13.</b> Pogladowy podział systemów wentylacji pożarowej	
<b>Rys. 3.14.</b> Pogladowy widok pomieszczenia z pracująca instalacja wentylacji oddymiającej i przy jej braku	
<b>Rys. 4.1.</b> Wykres szybkości wydzielania ciepła w pożarach rozwijających się na podstawie [35]	50
<b>Rys. 4.2.</b> Poglądowy rysunek przedstawiający podstawową różnicę pomiędzy instalacją tryskaczową a insta	lacją
nigiy would j	54
<b>Rys. 4.5.</b> Poglądowy widok polinieszczenia z urucholnioną instalacją ingły wodnej	34
<b>Rys. 4.4</b> . Pogrądowy wykles osrągniętych odległości przez krópie wody (0,12mm) w zależności od prędr	58
Rvs. 4.5. Widok stanowiska hadawczego [56]	50 59
Rys. 4.6. Widoki zewnetrzne stanowiska badawczego w skali rzeczywistej [57]	60
<b>Rys. 4.7</b> Widok wpętrzą stanowiską badawczego w programie do obliczeń numerycznych (EDS) [57]	60
<b>Rys. 5.1</b> Pogladowe porównanie zasad funkcionowania obu rozwiązań	00
<b>Rys. 5.7</b> Realizacia hadań – nodział na etany	02 63
Rys. 5.3. Realizacja badań Schemat blokowy realizacji badań etanu drugiego	05
<b>Bys. 5.4</b> Przykładowa wykres rozwoju pożaru o mocy całkowitej 6000 kW [37]	05
Rys. 5.5 Schemat stanowiska hadawczego	07
Rys. 5.6. Stanowisko badawcze - widok izometryczny	/ 1 72
$R_{ys}$ , 5.0. Sunowisko badawcze - widok izomet yczny	12
<b>Rys. 5.8</b> Stanowisko badawcze - widok z boku	73 72
<b>Rys. 5.0.</b> Stanowisko badawcze - widok z góry	73 74
Rys. 5.10. Widek stanowiska badawczego do wizualizacji przepława dumów	/+ 7/
rys. 5.10. Whok statowiska badawezego ub wizualizacji przeprywu dynibw	/4

Rys. 5.11. Widok stanowiska badawczego do wizualizacji przepływu dymów	75
Rys. 5.12. Widok stanowiska badawczego przygotowanego do badań	75
<b>Rys. 5.13.</b> Wykres zależności ilości wydzielanego ciepła od pola powierzchni paliwa [8]	77
<b>Rys. 5.14.</b> Widok pracującej dyszy mgły wodnej	80
<b>Rys. 5.15.</b> Poglądowy widok pomiaru zasięgu pracującej dyszy mgły wodnej	80
<b>Rys. 5.16.</b> Widok elementow składowych instalacji mgły wodnej	81
<b>Rys. 5.17.</b> Wykres charakterystyki hydraulicznej instalacji mgły wodnej zamontowanej na stanow	visku 82
Rys 518 Wykres zasiegu dyszy mgły wodnej zamontowanej na stanowisku badawczym	82
<b>Rys. 5.19</b> . Schemat stanowiska hadawczego. Pierwszy wariant hadania systemu mgły wodnej (DM1)	02
<b>Rys. 5.19</b> . Schemat stanowiska badawczego. Fielwszy wartant badania systemu meły wodnej (DMT)	05
<b>Rys. 5.21.</b> Wykres efektywności redukcji temperatury $n_{ATF}$ w zależności od czasu przy stałej wydaj	ności
instalacji oddymiającej V=180 m <sup>3</sup> /h, temperaturze powietrza zewnętrznego 27°C i temperaturze rozpylanej v 19°C.	wody 91
<b>Rys. 5.22.</b> Wykres efektywności redukcji temperatury $\eta_{\Delta TK}$ w zależności od czasu przy stałej wydaj:	ności
instalacji oddymiającej v=140 m /n, temperaturze powietrza zewnętrznego 27 C i temperaturze rozpylanej v 19°C	wody 91
<b>Rys. 5.23</b> Wykres efektywności redukcji temperatury n <sub>ATE</sub> w zależności od czasu przy stałej wydaj	ności
instalacji oddymiającej V=180 m <sup>3</sup> /h, temperaturze powietrza zewnętrznego 27°C i temperaturze rozpylanej v 19°C	wody 92
<b>Rys. 5.24.</b> Wykres efektywności redukcji temperatury $\eta_{ATS}$ w zależności od czasu przy stałej wydaj	ności
instalacji oddymiającej V=140 m <sup>3</sup> /h, temperaturze powietrza zewnętrznego 27°C i temperaturze rozpylanej v 19°C	wody 92
Rys. 5.25. Wykres efektywności redukcji temperatury $\eta_{\Delta TB}$ w zależności od czasu przy stałej wydaj.	ności
instalacji oddymiającej V=180 m <sup>3</sup> /h, temperaturze powietrza zewnętrznego 27°C i temperaturze rozpylanej v 19°C	wody 93
<b>Rys. 5.26.</b> Wykres efektywności redukcji temperatury $\eta_{\Delta TK}$ w zależności od ilorazu strumieni masowych	mgły
wodnej i powietrza przy temperaturze powietrza zewnętrznego 27°C i temperaturze rozpylanej wody 19°C	94
<b>Rys. 5.27.</b> Wykres efektywności redukcji temperatury $\eta_{\Delta TS}$ w zależności od ilorazu strumieni masowych wodnej i powietrze przy temperaturze powietrze zawnetrznego $27^{\circ}$ C i temperaturze rozpulanej wody 10°C	mgły
woulej i powietrza przy temperaturze powietrza zewnętrznego 27 C i temperaturze tozpytanej wody 19 C Rys. 6 1. Pogladowy podział domeny obliczeniowej na komórki obliczeniowe	95
<b>Rys. 6.2</b> Widoki modelu numerycznego stanowiska badawczego	102
<b>Rys. 6.3.</b> Walidacia modelu matematycznego. Wykres przyrostu temperatury w zależności od czasu dla pun	któw
pomiarowych T1 i T2. Badanie B1 i obliczenia ON1 (pożar PB1).	. 102
<b>Rys. 6.4.</b> Walidacja modelu matematycznego. Wykres przyrostu temperatury w zależności od czasu dla pun pomiarowych T3 i T4. Badanie B1 i obliczenia ON1 (pożar PB1)	któw 103
Rys. 6.5. Walidacja modelu matematycznego. Wykres przyrostu temperatury w zależności od czasu dla pun	któw
pomiarowych T1 i T2. Badanie B10 i obliczenia ON4 (pożar PB1)	. 103
<b>Rys. 6.6.</b> Walidacja modelu matematycznego. Wykres przyrostu temperatury w zależności od czasu dla pun pomiarowych T3 i T4. Badanie B10 i obliczenia ON4 (pożar PB1)	któw 104
<b>Rys. 6.7.</b> Walidacja modelu matematycznego. Przykładowy termogram przegród stanowiska badawczeg upływie około 60 sekund od momentu zapłonu. Badanie B10 i obliczenia ON4 (pożar PB1).	;o po 104
<b>Rys. 6.8.</b> Walidacja modelu matematycznego. Obliczeniowy rozkład temperatur na wewnętrznych przegro budowlanych po upływie około 60 sekund od momentu zapłonu. Badanie B10 i obliczenia ON4 (pożar PB1)	).105
<b>Rys. 6.9.</b> Obliczeniowy rozkład cząstek dymu w komorach po upływie około 19 sekund od momentu zap Badanie B10 i obliczenia ON4 (pożar PB1).	łonu. 105
<b>Rys. 6.10.</b> Obliczeniowy rozkład cząstek dymu i kropel wody w komorach po upływie około 60 sekun momentu zapłonu. Badanie B10 i obliczenia ON4 (pożar PB1).	ıd od 106
Rys. 6.11. Obliczeniowy rozkład temperatur w środkowej płaszczyźnie komór po upływie około 20 sekur momentu zapłonu. Badanie B10 i obliczenia ON4 (pożar PB1).	nd od 106
Rys.6.12. Obliczeniowy rozkład temperatur w środkowej płaszczyźnie komór po upływie około 60 sekun	ıd od
momentu zapłonu. Badanie B10 i obliczenia ON4 (pożar PB1)	. 107
Rys. 6.13. Poglądowy widok wnętrza modelu numerycznego pomieszczenia archiwum.	. 108
Rys. 6.14. Poglądowy widok zewnętrzny modelu numerycznego pomieszczenia archiwum	. 109
Rys. 6.15. Poglądowy widok wnętrza modelu numerycznego pomieszczenia sali wystawowej	. 110

Rys. 6.16. Poglądowy widok zewnętrzny modelu numerycznego pomieszczenia sali wystawowej 110
Rys. 6.17. Poglądowy widok wyników obliczeń numerycznych dla pomieszczenia archiwum po około 10
sekundach od wybuchu pozaru. 111
<b>Rys. 6.18.</b> Poglądowy widok wyników obliczeń numerycznych dla pomieszczenia archiwum po około 17 sekundach od wybuchu pożaru. 112
<b>Rys. 6.19.</b> Poglądowy widok wyników obliczeń numerycznych dla pomieszczenia archiwum po około 110 sekundach od wybuchu pożaru. 112
<b>Rys. 6.20.</b> Poglądowy widok wyników obliczeń numerycznych dla pomieszczenia archiwum po około 110 sekundach od wybuchu pożaru. 112
Rys. 6.21. Poglądowe obliczeniowe zmiany temperatury powietrza oraz dymów i gazów pożarowych w funkcji
czasu w pomieszczeniu archiwum. 113
Rys. 6.22. Poglądowy widok wyników obliczeń numerycznych dla pomieszczenia sali wystawowej po wybuchu
pożaru, uruchomieniu instalacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej 113
Rys. 9.1. Przykładowe wyniki obliczeń numerycznych – pomiar temperatur

### SPIS TABLIC

Tabl. 2.1. Pożary i ofiary śmiertelne w pożarach (z wyjątkiem będących następstwem wypadków drogowych) w         Polsce w latach 1999-2013
Tab. 2.2. Straty materialne powstałe w wyniku wystąpienia pożarów w Polsce w roku 2013
Tabl. 2.3. Umowny podział technicznych środków zabezpieczenia przeciwpożarowego
Tab. 3.1. Rozwój pożaru oraz szybkość wydzielania ciepła w pomieszczeniach o różnym przeznaczeniu dla pożaru kontrolowanego za pomocą paliwa       36
Tabl. 3.2. Wybrane parametry pożarów referencyjnych o stałej mocy w oparciu o [18].       37
Tabl. 3.3. Zestawienie porównawcze parametrów zapewniających bezpieczną ewakuację ludzi         43
Tabl. 5.1. Porównanie wyników obliczeń analitycznych określających wydajności instalacji oddymiającej 67
Tabl. 5.2. Zestawienie podstawowych równań skalowania modelu badawczego
Tabl. 5.3. Parametry techniczne głównych urządzeń zainstalowanych na stanowisku badawczym.       76
Tabl. 5.4. Oznaczenia oraz podstawowe parametry przyjętych pożarów badawczych
Tabl. 5.5. Oznaczenia oraz podstawowe parametry wariantów pracy systemu wentylacji oddymiającej (SHEVS)         w komorze badawczej       79
Tabl. 5.6. Oznaczenia oraz podstawowe parametry badanych wariantów pracy instalacji mgły wodnej
Tabl. 5.7. Parametry techniczne głównych przyrządów pomiarowych używanych na stanowisku badawczym 85
Tabl. 5.8. Parametry mierzone za pomocą przyrządów pomiarowych    87
Tabl. 5.9. Oznaczenia i zakres wykonanych badań na stanowisku badawczym.    87
Tabl.5.10. Uśrednione pomierzone parametry atmosferycznych warunków zewnętrznych i wewnętrznych 88
Tabl. 5.11. Przykładowy arkusz pomiarowy    89
<b>Tabl. 5.12.</b> Wyniki analizy statystycznej efektywności redukcji temperatury $\eta_{\Delta TK}$ w zależności od ilorazustrumieni masowych mgły wodnej i powietrza94
Tabl. 5.13. Wyniki analizy statystycznej efektywności redukcji temperatury $\eta_{\Delta TS}$ w zależności od ilorazustrumieni masowych mgły wodnej i powietrza.95
Tabl. 6.1. Oznaczenia i zakres wykonanych obliczeń numerycznych dla modelu stanowiska badawczego 101
Tabl. 9.1. Właściwości fizykochemiczne powietrza suchego o temperaturze 10°C (282,2 K) i przy ciśnieniup=1,013 10 <sup>5</sup> [64]
Tabl. 9.2. Właściwości fizykochemiczne powietrza suchego o temperaturze 30°C (303,2 K) i przy ciśnieniup=1,013 10 <sup>5</sup> [64]119
<b>Tabl. 9.3.</b> Przykładowe właściwości fizykochemiczne spalin o temperaturze 100°C (372,2 K) i przy ciśnieniu $p=1,01325 10^5$ o ilościach: $n_{CO2}=0,13$ ; $n_{H2O}=0,11$ ; $n_{N2}=0,76$ [64]
Tabl. 9.4. Właściwości fizykochemiczne wody destylowanej o temperaturze $10^{\circ}$ C (282,2 K) i przy ciśnieniu $p=0,01227 \ 10^{-5}$ [65]120
Tabl. 9.5. Właściwości fizykochemiczne wody destylowanej o temperaturze 20°C (292,2 K) i przy ciśnieniup=0,01227 10 <sup>-5</sup> [65]121
<b>Tabl. 9.6.</b> Wybrane uśrednione arkusze wyników pomiarów z 22 i 23 maja 2014r.122
Tabl. 9.7. Przykładowy arkusz uśrednionych wyników obliczeń numerycznych.         126

#### WYKAZ WAŻNIEJSZYCH DEFINICJI I TERMINÓW

- 1. Ochrona przeciwpożarowa polega na realizacji przedsięwzięć mających na celu ochronę życia, zdrowia, mienia lub środowiska przed pożarem, klęską żywiołową lub innym miejscowym zagrożeniem [1].
- **2. Techniczne środki zabezpieczenia przeciwpożarowego** urządzenia, sprzęt, instalacje oraz rozwiązania budowlane służące zapobieganiu powstaniu i rozprzestrzenianiu się pożarów [2].
- 3. Bierne zabezpieczenia przeciwpożarowe rozwiązania budowlane umożliwiające zachowanie odpowiedniej klasy odporności ogniowej elementów budynku, klasy odporności ogniowej oddzielenia przeciwpożarowego oraz klasy reakcji na ogień poszczególnych elementów budynku [3].
- 4. Czynne zabezpieczenia przeciwpożarowe urządzenia przeciwpożarowe i instalacje z nimi związane służące do zapobiegania powstaniu pożaru, wykrywające pożar, sygnalizujące stanu alarmu pożarowego, zwalczające pożar lub ograniczające jego skutki, zapewniające bezpieczną ewakuację oraz przeprowadzenie skutecznej akcji ratowniczo-gaśniczej [3].
- 5. Urządzenia przeciwpożarowe urządzenia (stałe lub półstałe, uruchamiane ręcznie lub samoczynnie) służące do zapobiegania powstaniu, wykrywania, zwalczania pożaru lub ograniczania jego skutków [2].
- 6. Systemu kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła system zestawu elementów zamontowanych w obiekcie budowlanym mającego za zadanie ograniczenie skutków oddziaływania dymu i ciepła wydzielanych podczas pożaru [4].
- 7. Systemu odprowadzania dymu i ciepła system kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła, który usuwa dym i ciepło wydzielane podczas pożaru [4].
- 8. Systemu wentylacji oddymiającej (ang. akronim SHEVS tj. smoke and heat exhaust ventilation system) system łącznie dobranych elementów do odprowadzania dymu i ciepła, którego zadaniem jest utrzymanie warstwy ciepłych gazów pożarowych, unoszących się ponad chłodniejszym, czystym powietrzem [4].
- **9. Zabezpieczenie przed zadymieniem dróg ewakuacyjnych** jest rozumiane jako zabezpieczenie przed utrzymywaniem się na drogach ewakuacyjnych dymu w ilości, która ze względu na ograniczenia widoczności, toksyczność lub temperaturę uniemożliwia bezpieczną ewakuację [2].
- 10. Stałe samoczynne urządzenia gaśnicze wodne urządzenie składające się z sieci przewodów obejmujących prawie cały obiekt i stale wypełnionych wodą lub powietrzem pod ciśnieniem. Zasada działania samoczynnych urządzeń gaśniczych wodnych polega na tym, że pod wpływem wzrostu temperatury spowodowanej pożarem następuje otwarcie elementu termoczułego i samoczynny wypływ czynnika gaśniczego z tryskacza lub dyszy.
- 11. System mgły wodnej jest to stałe samoczynne urządzenie gaśnicze wodne lub zabezpieczające umożliwiające rozproszenie wody na bardzo drobne krople. Podstawowym parametrem jest średnica charakterystyczna kropli wody oznaczana jako Dv<sub>f</sub>. Za mgłę wodną uważa się tak rozpyloną wodę, że wartość charakterystycznej kropli Dv<sub>0,90</sub><1000 μm [5]. Oznacza to, że 90% objętości rozpylonej wody będą stanowiły krople wody o średnicy od 0 do 1000 μm.</p>

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

Oznaczenie	Jednostka	Opis parametru		
a	m <sup>2</sup> /s	współczynnik wyrównania temperatury ( $a = \lambda/(\rho \cdot C_p)$ )		
А	m <sup>2</sup>	pole powierzchni		
C <sub>p</sub>	kJ/kg·K	ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu		
d, D	m	średnica		
$D_{\rm vf}$	m	średnica charakterystyczna kropli		
g	m/s <sup>2</sup>	przyspieszenie ziemskie		
Н	m	wysokość		
• h	W/m <sup>2</sup>	gęstości strumienia ciepła		
k	W/m <sup>2</sup> ·K	współczynnik przenikania ciepła		
I, L	m	długość		
• m	kg/s	strumień masy		
M <sub>C</sub>	kg	masa materiału palnego		
Nu	-	liczba podobieństwa Nusselta (Nu=αl/λ)		
p, P	N/m <sup>2</sup>	ciśnienie		
Pr	-	liczba podobieństwa Prandtla (Pr=a/v)		
Qc	W	całkowita moc pożaru		
Qp	W	całkowity strumień ciepła		
Re	-	liczba podobieństwa Reynoldsa (Re=w·l/v)		
S	ppm	stężenie (part per milion – $1/10^6$ )		
t, T	°C	temperatura		
t <sub>zew</sub>	°C	temperatura zewnętrzna		
t <sub>wew</sub>	°C	temperatura wewnętrzna		
V	m <sup>3</sup> /s	strumień objętości		
w	m/s	prędkość przepływu		
x, y, z	-	rzędne liniowe		
λ	W/m·K	współczynnik przewodzenia ciepła (przewodność)		
υ	m <sup>2</sup> /s	współczynnik lepkości kinematycznej		
ρ	kg/m <sup>3</sup>	gęstość		
τ	S	czas		

## 1. WSTĘP

# 1.1. Instalacja wentylacji oddymiającej i instalacja mgły wodnej w ochronie przeciwpożarowej budynku

Jednym z podstawowych zadań współczesnej inżynierii w budownictwie jest zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa ludzi, w tym również zapewnienie stabilnych warunków bezpieczeństwa pożarowego. Techniczne środki zabezpieczenia przeciwpożarowego mają ogromne znaczenie dla bezpieczeństwa użytkowników budynków. Szczególnego znaczenia nabierają one w budynkach wielofunkcyjnych, wielkopowierzchniowych oraz budynkach wysokich i wysokościowych.

Ochrona przeciwpożarowa obejmuje szeroki zakres, wzajemnie powiązanych przedsięwzięć mających na celu ochronę życia, zdrowia, mienia oraz środowiska przed pożarem przez wykorzystanie systemów, instalacji, urządzeń oraz rozwiązań budowlanych służących zapobieganiu powstaniu i rozprzestrzenianiu się pożarów [1]. Każdy budynek i urządzenia z nim związane powinny być zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby zapewnić w razie pożaru [6]:

a) nośność konstrukcji przed określony czas,

- b) ograniczenie rozprzestrzeniania się ognia i dymu w budynku,
- c) ograniczenie rozprzestrzeniania się pożaru na sąsiednie budynki,
- d) możliwość ewakuacji ludzi,
- e) uwzględnić bezpieczeństwo ekip ratowniczych oraz chronić mienie.

Podstawową zasadą współczesnej ochrony przeciwpożarowej jest właściwy dobór, zapewnienie niezawodności i poprawnego współdziałania różnych urządzeń przeciwpożarowych oraz rozwiązań budowlanych. Należy w tym miejscu wyraźnie podkreślić fakt, że spełnienie wymagań ochrony przeciwpożarowej w budynkach polega nie tylko na zaprojektowaniu i zainstalowaniu określonych w przepisach urządzeń przeciwpożarowych, ale przede wszystkim zapewnieniu ich prawidłowego współdziałania w każdych warunkach pożarowych.

Czynnikiem dominującym, który kształtuje konieczne do poniesienia nakłady inwestycyjne, a później koszty związane z utrzymaniem sprawności technicznych środków zabezpieczenia pożarowego w budynku jest zapewnianie zdefiniowanego wcześniej poziomu bezpieczeństwa pożarowego, w tym warunków bezpiecznej ewakuacji ludzi z budynku.

Poznanie i wstępne określenie stopnia wzajemnego oddziaływania w warunkach pożarowych instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej może przyczynić się do poprawy warunków ewakuacji oraz pozwolić na zoptymalizowanie nakładów inwestycyjnych.

Jednym z najważniejszych czynników wpływających na zapewnienie bezpiecznych warunków ewakuacji ludzi z budynku jest utrzymywanie odpowiedniej wartości temperatury dymów i gazów pożarowych. Aktualnie, wymaganą wartość temperatury osiąga się przez zwiększanie wydajności mechanicznych systemów wentylacji oddymiającej. Takie rozwiązanie, oprócz aspektu wzrostu nakładów inwestycyjnych powoduje również problemy natury technicznej związane z trudnościami z utrzymaniem wymaganej wysokości i jednorodności podstropowej warstwy dymów i gazów pożarowych (efekt Venturiego).

Niezależnie projektowane i montowane komponenty instalacji mgły wodnej lub instalacji tryskaczowej w strefie podstopnej pomieszczenia przyczyniają się do powstanie kolejnych problemów związanych z ochładzaniem, a następnie niekontrolowanym opadaniem podstropowej warstwy dymu. Znajomość zjawisk zachodzących w warunkach pożarowych podczas równoczesnej pracy instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej oraz przebiegu tych zjawisk może pozwolić na ustalenie nowych konfiguracji i parametrów technicznych pracy obu instalacji.

Odpowiednio zlokalizowane dysze mgły wodnej o odpowiednich parametrach technicznych oraz lokalizacja otworów napływowych i prędkość powietrza kompensacyjnego, które będzie unosiło rozpylone krople mgły wodnej mogą zapewnić szybką ich dystrybucję w pomieszczeniu, przez co przyczynić się do ograniczania rozwoju pożaru oraz szkód materialnych wywołanych pożarem.

Zastosowanie nowej konfiguracji instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej w budynkach modernizowanych lub nowoprojektowanych może zostać oparte o zasady bezpieczeństwa pożarowego i spełnienie określonych celów. Takie podejście może pozwolić na zoptymalizowanie rozwiązań technicznych i inwestycyjnych w zakresie środków zabezpieczenia przeciwpożarowego w wielu budynkach adekwatnie do zidentyfikowanych zagrożeń.

#### 1.2. Cel, zakres i tezy rozprawy doktorskiej

Głównym celem niniejszej pracy jest ocena efektywności współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej z instalacją mgły wodnej w budynkach w aspekcie poprawy warunków ewakuacji, ograniczenia szkód w wyposażeniu budynków wywołanych pożarem oraz optymalizacji kosztów wykonania wymienionych instalacji. Ocena współdziałania obu instalacji została przeprowadzona dla mechanicznej instalacji wentylacji oddymiającej.

Celami pośrednimi niniejszej pracy są:

- 1. Wyznaczenie zależności efektywności obniżenia temperatury w pomieszczeniu podczas pożaru od parametrów mediów doprowadzanych do pomieszczenia tj. strumienia masy powietrza kompensującego, strumienia masy mgły wodnej i usuwanych z pomieszczenia tj. strumienia masy usuwanych dymów i gazów pożarowych;
- 2. Porównanie wyników badań uzyskanych na stanowisku badawczym z danym uzyskanymi na podstawie obliczeń numerycznych (obliczenia numeryczne CFD).

W oparciu o badania wstępne, eksperymenty eksploatacyjne oraz analizę danych literaturowych zostały przyjęte następujące tezy badawcze:

- 1. Zastosowanie współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej w pomieszczeniach objętych pożarem obniży temperaturę odczuwalną oraz temperaturę dymów i gazów pożarowych;
- 2. Istnieje zależność między efektywnością redukcji temperatury w pomieszczeniu podczas pożaru, temperaturą usuwanych gazów pożarowych oraz ilorazem strumienia masowego mgły wodnej i powietrza.

Realizacja celów ustalonych w niniejszej rozprawie doktorskiej została podzielona na cztery główne etapy:

Etap pierwszy

1. Przygotowanie autorskiej metodyki przeprowadzenia badań współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej z instalacją mgły wodnej w warunkach zbliżonych do

warunków, w których przeprowadzono badanie wyłącznie instalacji wentylacji oddymiającej;

- 2. Wykonanie niezbędnych obliczeń analitycznych dla przyjętego rozwiązania badawczego;
- Wykonanie autorskiego projektu stanowiska badawczego w oparciu o normę ISO/TS 17431:2006 Fire tests – Reduced-scale model box test [7] oraz normę AS 4391:1999 Smoke management systems – Hot smoke test [8];
- 4. Wykonanie badań na stanowisku badawczym;
- 5. Przeprowadzenie analiz porównawczych.

#### Etap drugi

- 1. Przygotowanie autorskiej metodyki przeprowadzenia badań w celu wyznaczenia efektywności redukcji temperatury podczas pożaru, temperatury usuwanych gazów pożarowych oraz ilorazu strumieni masowych mgły wodnej i powietrza;
- 2. Wykonanie układów pomiarowych na stanowisku badawczym;
- 3. Wykonanie badań na stanowisku badawczym;
- 4. Przeprowadzenie analiz porównawczych.

#### Etap trzeci

- Przygotowanie modelu numerycznego stanowiska badawczego w programie FDS (Fire Dynamics Simulator) w celu wyznaczenia efektywności redukcji temperatury podczas pożaru, temperatury usuwanych gazów pożarowych oraz ilorazu strumieni masowych mgły wodnej i powietrza;
- 2. Przygotowanie układów pomiarowych na potrzeby modelu numerycznego;
- 3. Wykonanie obliczeń numerycznych;
- 4. Przeprowadzenie analiz porównawczych.

#### Etap czwarty

- 1. Przygotowanie modeli numerycznych pomieszczeń o dużej i małej kubaturze w programie FDS (Fire Dynamics Simulator) w celu wyznaczenia efektywności redukcji temperatury podczas pożaru, temperatury usuwanych gazów pożarowych oraz ilorazu strumieni masowych mgły wodnej i powietrza;
- 2. Przygotowanie układów pomiarowych na potrzeby modelu numerycznego;
- 3. Wykonanie obliczeń numerycznych;
- 4. Przeprowadzenie analiz porównawczych.

Jedną z przyczyn przeprowadzenia badań w średniej skali (tj. reduced - scale model box test w oparciu o [7]) w przyjętych formach były ograniczenia w ustaleniach warunków współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej z instalacją mgły wodnej w skali rzeczywistej. Warunki techniczne i ekonomiczne uniemożliwiły przeprowadzenie kompletnych badań uwzględniających pełne spektrum współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej z instalacją mgły wodnej w skali rzeczywistej. Opierając się na ustaleniach normy [7] można stwierdzić, że badania w średniej skali dają wyniki wystraczająco wiarygodne.

### 2. SYSTEMY I URZĄDZENIA PRZECIWPOŻAROWE W OBIEKTACH BUDOWLANYCH

#### 2.1. Statystyki pożarów

Wybuch pożaru w budynku stwarza olbrzymie niebezpieczeństwo dla przebywających w nim ludzi. Tylko w roku 2013 w Polsce zginęło w pożarach około 515 osób. Od kilku lat, roczna liczba ofiar śmiertelnych pożarów nie maleje. W poniższej tablicy (tabl. 2.1) podano zestawienie liczby pożarów oraz ilości ofiar śmiertelnych w latach 1999-2013.

Rok	Liczba pożarów łącznie	Liczba ofiar śmiertelnych	
1999	136 284	462	
2000	135 889	426	
2001	116 602	420	
2002	151 026	431	
2003	220 855	476	
2004	146 728	446	
2005	184 316	543	
2006	165 190	568	
2007	151 069	553	
2008	161 744	534	
2009	159 122	540	
2010	135 555	525	
2011	171 839	585	
2012	183 888 564		
2013	126 426 515		

Tabl. 2.1. Pożary i ofiary śmiertelne w pożarach (z wyjątkiem będących następstwem wypadków drogowych) w<br/>Polsce w latach 1999-2013

(źródło: dane statystyczne KG PSP www.kgpsp.gov.pl)

Na poniższych rysunkach (2.1-2.5) przedstawiono aktualne dane statystyczne dotyczące pożarów w Polsce. Procentowe przykładowe zestawienie przyczyn pożarów w Niemczech w obiektach opieki nad osobami starszymi zamieszczono na rys. 2.6. Natomiast w tabeli 2.2. zostały zestawione straty materialne powstałe w wyniku pożarów w Polsce w roku 2013. W celach porównawczych na rys. 2.7. przedstawiono straty materialne będące skutkiem pożarów w Niemczech.



**Rys. 2.1**. Liczba pożarów w obiektach użyteczności publicznej w Polsce w roku 2013 (źródło: dane statystyczne KG PSP www.kgpsp.gov.pl)



**Rys. 2.2.** Liczba pożarów w obiektach mieszkalnych w Polsce w roku 2013 (źródło: dane statystyczne KG PSP www.kgpsp.gov.pl)



**Rys. 2.3.** Liczba pożarów w obiektach produkcyjnych w Polsce w roku 2013 (źródło: dane statystyczne KG PSP www.kgpsp.gov.pl)



**Rys. 2.4**. Liczba pożarów w obiektach magazynowych w Polsce w roku 2013 (źródło: dane statystyczne KG PSP www.kgpsp.gov.pl)



**Rys. 2.5**. Przypuszczalne przyczyny pożarów w obiektach budowlanych w Polsce w roku 2013 (źródło: Dane statystyczne KG PSP www.kgpsp.gov.pl)



Rys. 2.6. Przypuszczalne przyczyny pożarów w Niemczech w obiektach opieki nad osobami starszymi [9]

Podział administracyjny		Ogółem			Średnio na 1 zdarzenie			
LP.	Jednostka podziału	Straty	w tym budynki	Mienie uratowane	Straty	w tym budynki	Mienie uratowane	
-	-	[tys. PLN]	[tys. PLN]	[tys. PLN]	[tys. PLN]	[tys. PLN]	[tys. PLN]	
1	POLSKA	999885,4	356213,4	8075158	2,9582	1,1765	23,2421	
Woj	ewództwo:							
2	Dolnośląskie	56999,3	19682,4	774741	1,8245	0,7088	27,7953	
3	Kujawsko-pomorskie	39521,9	12644,4	297467	2,3429	0,8043	14,6599	
4	Lubelskie	37424,8	19765,9	274016	2,5782	1,398	20,2425	
5	Lubuskie	34344,4	12790,9	398173	2,834	1,0182	31,6926	
6	Łódzkie	49243,2	24070,6	464020	2,3073	1,2331	14,1689	
7	Małopolskie	113777,3	32151,2	328819	3,3472	1,2307	12,6887	
8	Mazowieckie	204316,4	57857,2	795358	4,8509	1,5266	17,7142	
9	Opolskie	17552,7	5653,8	237061	2,2813	0,6536	14,8311	
10	Podkarpackie	39152	17210	385480	2,5843	1,1518	17,3658	
11	Podlaskie	31948,4	19742,6	260722	4,0457	2,275	27,3634	
12	Pomorskie	64892,4	25768,9	641225	2,8993	1,1656	24,6695	
13	Śląskie	81754,5	29097,2	881424	1,9173	0,703	16,8078	
14	Świętokrzyskie	22738,7	9098,3	260489	2,3689	0,8585	28,9737	
15	Warmińsko-mazurskie	60864,6	26117,7	214011	3,3432	1,3977	13,0479	
16	Wielkopolskie	91212,5	25846,6	446779	3,6459	1,0358	15,1594	
17	Zachodniopomorskie	54142,3	18715,7	1415373	4,16	1,6632	74,6933	

Tab.	2.2.	Straty	materialne	e powstałe	w wyniku	ı wystąpienia	pożarów	w Polsce	w roku 2013	3
			(źródło: J	Dane staty	styczne K	G PSP www	.kgpsp.go	v.pl)		



Rys. 2.7. Straty materialne powstałe w wyniku wystąpienia pożarów w Niemczech [10].

W oparciu o statystyki Komend Głównej PSP można stwierdzić, że w większości przypadków w obiektach budowlanych mamy do czynienia z pożarami małymi o powierzchni nie większej niż 70m<sup>2</sup>. Pomimo tego każdego roku w Polsce w pożarach traci życie około 500 osób. Około 80% ofiar pożarów ginie w wyniku zatrucia trującymi gazami zawartymi w dymach pożarowych.

#### 2.2. Podstawowe zagrożenia pożarowe

Zagrożenia związane z pożarem można podzielić na <u>pięć podstawowych grup</u>. Do <u>pierwszej grupy</u> można zaliczyć promieniowanie cieplne związane z bezpośrednim oddziaływaniem płomieni oraz oddziaływanie termiczne produktów spalania. <u>Kolejną grupę</u> zagrożeń stanowią dymy i toksyczne gazy pożarowe. Do <u>trzeciej grupy</u> zalicza się ograniczenie zasięgu widzialności, które przyczynia się do opóźnień lub uniemożliwia ewakuacje ludzi z zagrożonej strefy. <u>Czwartą grupę</u> zagrożeń stanowią czynniki związane z obniżeniem zawartości tlenu w powietrzu. <u>Piąta grupa</u> to wszelkiego rodzaju uszkodzenia elementów obiektów budowalnych zagrażające zdrowiu i życiu ludzi.

Największym zagrożeniem dla ewakuujących się ludzi z budynków są dymy i toksyczne produkty spalania powstające podczas pożaru. Na poniższym rysunku zostały przedstawione. Poglądowe zestawienie strumieni objętości dymów i gazów pożarowych, które mogą powstać podczas pożaru w zależności od rodzaju materiału zostały podane na rysunku 2.8.



**Rys. 2.8.** Poglądowe zestawienie strumieni objętości dymów i gazów pożarowych, które mogą powstać podczas pożaru w zależności od rodzaju materiału [11]

Przykładowo drugiego marca 2011 roku w Lublińcu (woj. śląskie) doszło do pożaru na oddziale szpitalnym w Wojewódzkim Szpitalu Neuropsychiatrycznym. W wyniku zdarzenia trzech pacjentów poniosło śmierć, a kolejnych 8 zostało poszkodowanych na skutek podtrucia tlenkiem węgla i innymi produktami spalania.

Tlenek węgla podczas typowego pożaru wydziela się w olbrzymich ilościach. Długi okres czasu oddziaływania gazu na ludzi, bezwonność gazu oraz jego łatwość łączenia się z ludzką hemoglobiną sprawiają, że tlenek węgla jest główną przyczyną śmierci ofiar pożarów, pomimo jego niskiej toksyczności.

#### 2.3. Podstawowe cele ochrony przeciwpożarowej w budynkach

Cele ochrony przeciwpożarowej zostały określone i zdefiniowane w ustawie o ochronie przeciwpożarowej [1]. W artykule 1 ustawy podano definicję pojęcia ochrony przeciwpożarowej. Ochrona przeciwpożarowa polega na realizacji przedsięwzięć mających na celu ochronę życia, zdrowia, mienia lub środowiska przed pożarem, klęską żywiołową lub innym miejscowym zagrożeniem.

Podstawowymi celami ochrony przeciwpożarowej w odniesieniu do budynków jest zapobieganie powstawaniu i rozprzestrzenianiu się pożaru, zapewnieniu sił i środków do zwalczania pożaru oraz umożliwienie prowadzenia działań ratowniczych. Ze względu na rodzaj budynków, wielofunkcyjne przeznaczenie, użytkowników, zastosowane rozwiązania architektoniczno-budowlane itp. tworząc koncepcję ochrony przeciwpożarowej należy każdorazowo wyznaczyć cele zastosowanych rozwiązań z uwzględnieniem bezpieczeństwa użytkowników, specyfiki budynku oraz pozostałych aspektów [12]. Na poniższym rysunku (rys. 2.9) przedstawiono poglądowy podział celów ochrony przeciwpożarowej w obiektach budowlanych.



Rys. 2.9. Poglądowy podział celów ochrony przeciwpożarowej w budynku

#### 2.4. Koncepcja ochrony przeciwpożarowej

Koncepcja ochrony przeciwpożarowej budynku powinna powstać na wstępnym etapie projektowania budynku i odzwierciedlać analizę możliwych zagrożeń pożarowych, wybuchowych oraz proponowane rozwiązania techniczne zapewniające odpowiedni poziom bezpieczeństwa pożarowego. Identyfikacja i analiza potencjalnych zagrożeń pożarowych powinna być okresowo weryfikowana w miarę postępu prac projektowych, ale również na etapie eksploatacji budynku.

Minimalne wymagania w zakresie bezpieczeństwa pożarowego w odniesieniu do budynków nowobudowanych i modernizowanych zostały określone w obowiązujących przepisach techniczno-budowlanych i przepisach przeciwpożarowych. Jednoznaczne określenie celów ochrony przeciwpożarowej oraz zastosowanie odpowiednich technicznych środków zabezpieczenia przeciwpożarowego powinno stanowić integralną części każdego projektu budowlanego.

Obowiązujące przepisy dopuszczają spełnienie wymagań w zakresie bezpieczeństwa pożarowego w inny sposób niż to określono w przepisach techniczno-budowlanych, w przypadkach wskazanych przez te przepisy oraz dopuszczają zastosowanie rozwiązań

zamiennych, zapewniających niepogorszenie warunków ochrony przeciwpożarowej, w przypadkach wskazanych przez przepisy przeciwpożarowe [13].

Koncepcja ochrony przeciwpożarowej powinna zapewniać ograniczenie do niezbędnego minimum ryzyka wystąpienia zagrożenia pożarem, a w przypadku wystąpienia pożaru zapewniać bezpieczną ewakuację ludzi, ograniczać skutki pożaru oraz zapewniać możliwość gaszenia pożaru. W celu określania wymagań ochrony pożarowej w budynku należy przeprowadzić każdorazowo analizę ewentualnych zagrożeń, która powinna obejmować między innymi:

- podstawowe informacje o budynku takie jak: powierzchnia, wysokości, liczba kondygnacji, funkcja budynku, klasę odporności pożarowej, klasę odporności ogniowej, stopień rozprzestrzeniania ognia przez elementy budynku, podział na strefy pożarowe itp.
- 2) odległość od sąsiednich obiektów budowlanych, w tym dróg pożarowych,
- 3) rodzaj i ilość materiałów, substancji przechowywanych w budynku,
- 4) rodzaj i ilość użytkowników, przewidywany funkcjonalny sposób wykorzystania budynku i warunki ewakuacji,
- 5) rodzaj zastosowanych urządzeń przeciwpożarowych,
- 6) sposób zabezpieczenia przeciwpożarowego instalacji użytkowych w budynku,
- 7) wpływ środowiska zewnętrznego,
- 8) wpływ środowiska wewnętrznego.

Bardzo istotnym, a często pomijanym w ocenie stopnia ochrony przeciwpożarowej w budynku jest wpływ środowiska zewnętrznego na bezpieczeństwo pożarowe. Duże różnice temperatur, nieszczelność przegród budowlanych, wpływ wiatru na budynek, oddziaływanie budynków sąsiednich (np. zjawisko cienia aerodynamicznego), możliwe zaleganie śniegu itp. mogą mieć istotny wpływ na stan bezpieczeństwa pożarowego.

W okresie ostatnich kilku lat, w krajach rozwiniętych można zaobserwować tendencje zmiany charakteru przepisów przeciwpożarowych (np. przepisy brytyjskie po roku 2008) [14]. Poglądowy podział procedur projektowych zawarto na poniższym rysunku (rys. 2.10).



Rys. 2.10. Poglądowy podział procedur projektowych

Następuje powolne odchodzenie od przepisów nakazowo-opisowych na rzecz przepisów użytkowych zorientowanych na cel, któremu mają służyć. Poglądowy wykres faz projektowania technicznych środków zabezpieczenia przeciwpożarowego zorientowanych na cel i własności użytkowe został pokazany na poniższym rysunku (rys. 2.11).



**Rys. 2.11.** Poglądowy wykres faz projektowania technicznych środków zabezpieczenia przeciwpożarowego zorientowanych na cel i własności użytkowe

Celem zmian jest dostosowanie projektowanych rozwiązań technicznych do rzeczywistego poziomu zagrożenia pożarowego. Nadrzędnym celem jest oczywiście osiągniecie akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa ludzi, zwierząt, środowiska naturalnego oraz ochrony mienia.

Zgodnie z definicją zawartą w normach europejskich, pożar jest zjawiskiem przypadkowym, zależnym od funkcji i sposobu użytkowania obiektu budowlanego.

W oparciu o analizy statystyk zdarzeń w krajach europejskich stwierdzono, że w znacznej większości zaistniałych pożarów, dzięki zastosowaniu odpowiednich rozwiązań technicznych pożar został szybko wykryty i ugaszony we wstępnej fazie. Zatem osiągniecie akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa może nastąpić przez zaprojektowanie i wykonanie właściwych tylko dla danego obiektu budowlanego czynnych i biernych zabezpieczeń przeciwpożarowych. Takie podejście umożliwia stosowanie nowych rozwiązań technicznych gwarantujących wymagany w danym obiekcie budowalnym poziom bezpieczeństwa pożarowego. Dotyczy to szczególnie budynków modernizowanych, w których ze względu na ograniczenia konstrukcyjno-budowlane lub/i architektoniczne zastosowanie rozwiązań tradycyjnych jest utrudnione.

#### 2.5. Techniczne środki zabezpieczenia przeciwpożarowego

Techniczne środki zabezpieczenia przeciwpożarowego zostały zdefiniowane w przepisach przeciwpożarowych [2] jako urządzenia, sprzęt, instalacje oraz rozwiązania budowlane służące zapobieganiu powstaniu i rozprzestrzenianiu się pożarów.

Przedmiotowe rozwiązania można umownie podzielić na dwie zasadnicze grupy [3]. Pierwsza grupa do zabezpieczenia bierne, a druga grupa to zabezpieczenia czynne. W poniższej tabeli (tabl. 2.3) zaprezentowano umowny podział technicznych środków zabezpieczenia przeciwpożarowego.

Techniczne śro przeciw	odki zabezpieczenia pożarowego	Ochrona przec	iwpożarowa
Zabezpieczenia bierne	Zabezpieczenia czynne	Miejscowa	Publiczna
<ol> <li>Rodzaj materiałów budowlanych</li> <li>Konstrukcje przegród budowlanych</li> <li>Podział na strefy pożarowe</li> <li>Wydzielenie dróg ewakuacyjnych</li> <li>Drogi pożarowe</li> <li>Przejścia instalacyjne</li> </ol>	<ol> <li>Instalacje zapobiegające powstaniu pożaru</li> <li>Instalacje wykrywające pożar</li> <li>Instalacje sygnalizujące pożar</li> <li>Urządzenia zapewniające bezpieczną ewakuację</li> <li>Instalacje gaśnicze</li> <li>Instalacje ułatwiające akcje ratowniczo-gaśniczą</li> </ol>	<ol> <li>Zakładowa straż pożarna</li> <li>Inspektor ochrony przeciwpożarowej</li> <li>Instrukcje bezpieczeństwa pożarowego</li> <li>Gaśnice</li> <li>Szkolenia</li> <li>Próby ewakuacji</li> </ol>	<ol> <li>Państwowa Straż Pożarna</li> <li>Ochotnicza Straż Pożarna</li> <li>Zaopatrzenie w wodę do zewnętrznego gaszenia pożarów</li> <li>Telefony alarmowe: 998</li> </ol>
Ochrona pasywna	-		Ochrona aktywna

Tabl. 2.3. Umowny podział technicznych środków zabezpieczenia przeciwpożarowego

Bierne zabezpieczenia przeciwpożarowe obejmują rozwiązania budowlane umożliwiające zachowanie odpowiedniej klasy odporności ogniowej elementów budynku, klasy odporności ogniowej oddzielenia przeciwpożarowego oraz klasy reakcji na ogień poszczególnych elementów budynku.

Do tej grupy można zaliczyć również rozwiązania techniczne przepustów instalacyjnych, dla których wymagana jest również klasa odporności ogniowej, zamknięcia przeciwpożarowe oraz ogniochronne kanały kablowe itp.

Czynne zabezpieczenia przeciwpożarowe obejmują przede wszystkim urządzenia przeciwpożarowe i instalacje z nimi związane służące do zapobiegania powstaniu pożaru, wykrywające pożar, sygnalizujące stanu alarmu pożarowego, zwalczające pożar lub ograniczające jego skutki, zapewniające bezpieczną ewakuację oraz przeprowadzenie skutecznej akcji ratowniczo-gaśniczej.

#### 2.5.1. Urządzenia przeciwpożarowe zapobiegające powstaniu pożaru

#### Systemy inertyzujące

Zasada działania systemów inertyzujących polega na zmniejszeniu stężenia tlenu w powietrzu pomieszczenia chronionego. Zasysane przez urządzenie powietrze jest sprężane, rozdzielane na azot i tlen. Zmniejszenie stężenia tlenu do około 15% jest większości wypadków wystarczające do wyeliminowania ryzyka pożaru w pomieszczeniu. Systemy inertyzujące dzieli się w zależności od sposobu utrzymywania zadanego stężenia tlenu w powietrzu.

#### Urządzenia zraszaczowe zabezpieczające

Urządzenia zraszaczowe są specjalnymi urządzeniami zabezpieczającymi (lub gaśniczymi) przed możliwością wystąpienia lub rozprzestrzeniania się pożaru. Podstawowym zadaniem urządzeń zraszaczowych zabezpieczających jest ochrona danego obiektu przed nadmiernym promieniowaniem cieplnym. Cechą charakterystyczną urządzeń zraszaczowych jest to, że zraszacze umieszczone na przewodach są stale otwarte.

#### 2.5.2. Urządzenia przeciwpożarowe wykrywające pożar

#### Systemy sygnalizacji pożaru

Podstawowymi zadaniami systemów sygnalizacji pożaru jest wykrycie co najmniej jednego zjawiska fizycznego i/lub chemicznego, które towarzyszy pożarowi oraz przekazanie sygnału o zaistniałym zdarzeniu do centrali sygnalizacji pożaru. Urządzeniami służącym do dozorowania i wczesnego wykrywania ewentualnego pożaru są czujki pożarowe (automatyczny ostrzegacz pożarowy). Czujki pożarowe można podzielić na dwie zasadnicze grupy: ręczne i automatyczne [15]. Do pierwszej grupy zalicza się ręczne ostrzegacze pożarowe. Do drugiej grupy należą automatyczne czujki dymu, czujki ciepła, czujki płomienia lub czujki wielosensorowe.

Centrala sygnalizacji pożaru ma za zadanie zasygnalizowanie w sposób optyczny i dźwiękowy alarmu pożarowego. W zależności od rodzaju budynku, wyposażenia technicznego, scenariusza rozwoju pożaru itp. centrala może również wyłączyć instalacje użytkowe oraz sterować działaniem urządzeń przeciwpożarowych. Dodatkowo centrala sygnalizacji pożaru przekazuje informacje o pożarze do alarmowego centrum odbiorczego (najczęściej jednostka PSP). Centrala sygnalizacji pożaru nadzoruje stan wszystkich elementów systemu wraz z liniami połączeniowymi.

#### 2.5.3. Urządzenia przeciwpożarowe sygnalizujące pożar

#### Dźwiękowe systemy ostrzegawcze

W przypadku stwierdzenia pożaru w budynku dźwiękowe systemy ostrzegawcze mają za zadanie powiadomienie użytkowników za pomocą zrozumiałych komunikat głosowych o zaistniałym zagrożeniu oraz wskazanie sposobu ewakuacji.

#### Urządzenia alarmowe systemu sygnalizacji pożaru

Systemy sygnalizacji pożaru mogą zostać wyposażone w sygnalizatory akustyczne i optyczne. Zarówno pożarowa sygnalizacja akustyczna, jak i optyczna powinna wyraźnie odróżniać się od sygnałów normalnie występujących w obiekcie.

#### Dodatkowa sygnalizacja

Zadziałanie samoczynnych urządzeń gaśniczych wodnych może być wykorzystane do powiadamiania o powstaniu pożaru w chronionym obiekcie.

#### 2.5.4. Urządzenia przeciwpożarowe zapewniające bezpieczną ewakuację

#### Systemy oświetlenia awaryjnego

Systemy oświetlenia awaryjnego służą do zapewnienia niezbędnego poziomu oświetlenia po zaniku oświetlenia podstawowego. Systemy oświetlenia awaryjnego dzieli się na oświetlenie ewakuacyjne oraz oświetlenie zapasowe [16]. Podstawowym celem awaryjnego oświetlenia ewakuacyjnego jest zapewnienie użytkownikom budynku bezpiecznego wyjścia.

#### Systemy ruchomych kurtyn dymowych

Kurtyny dymowe służą do kontrolowania przemieszczania się dymu w budynku przez stworzenie odpowiednich barier. Funkcja ruchomych kurtyn dymowych odpowiada funkcji kurtyn stałych. Podstawowymi zadaniami kurtyn dymowych w czasie pożaru są:

1) stworzenie zbiornika dla dymu i gazów pożarowych,

2) ukierunkowanie przepływu dymów i gazów pożarowych,

3) zapobieganie lub opóźnianie przepływu dymu i gazów pożarowych do innych stref budynku,

4) współdziałanie z urządzeniami przeciwpożarowymi w budynku.

#### Systemy wentylacji pożarowej

Podstawowym celem działania systemów wentylacji pożarowej w budynku jest zabezpieczenie i zapobieganie zadymieniu dróg ewakuacyjnych. Prawidłowe działanie tych systemów umożliwia sprawną i bezpieczną ewakuację ludzi z zagrożonej strefy. Systemy wentylacji pożarowej muszą zapobiegać nadmiernemu ograniczeniu widoczności przez przeciwdziałanie rozprzestrzenianiu się dymów i gazów pożarowych, obniżać odczuwalną temperaturę oraz ograniczać spadek stężenia tlenu poniżej wartości zagrażających życiu i zdrowiu ludzi. Podstawowe informacje dotyczące przedmiotowych systemów można znaleźć na przykład w [4], [17], [18], [19], [20], [21].

#### 2.5.5. Gaśnicze urządzenia przeciwpożarowe

#### Instalacja i sieci wodociągowe przeciwpożarowe

Wodociągowe urządzenia przeciwpożarowe mają za zadanie zapewnić możliwość szybkiego i skutecznego gaszenia pożarów w miejscu ich powstania. Podstawowym zadaniem instalacji i związanych z nią urządzeń jest dostarczenie czynnika gaśniczego w niezbędnej ilości i pod odpowiednim ciśnieniem. Wodociągowe urządzenia przeciwpożarowe dzieli się na hydranty zewnętrzne i hydranty wewnętrzne.

#### Stałe urządzenia gaśnicze gazowe

Stałe urządzenia gaśnicze gazowe mają za zadanie rozprowadzić w przestrzeni chronionej gaz w taki sposób, aby uzyskać wymagane stężenie gaśnicze. Gazami używanymi obecnie do gaszenia pożarów są gazy obojętne (np. Argon, Inergen, Argonit), gazowe chlorowcopochodne węglowodorów (zmienniki halonów np. halon 1301, CEA 410) oraz dwutlenek węgla. Stężenie gaszące gazu jest to najniższe stężenie, przy którym nastąpi przerwanie procesu rozwoju pożaru w chronionej przestrzeni.

#### Stałe samoczynne urządzenia gaśnicze wodne

Stałe samoczynne urządzenia gaśnicze wodne charakteryzują się tym, że obejmują cały budynek oraz tym że sieć przewodów jest na stałe wypełniona wodą. Zasada działania samoczynnych urządzeń gaśniczych wodnych polega na tym, że pod wpływem wzrostu temperatury spowodowanej pożarem następuje otwarcie elementu termoczułego i samoczynny wypływ czynnika gaśniczego z tryskacza lub dyszy. Wypływ z systemu wody powoduje uruchomienie akustycznych urządzeń alarmowych sygnalizujących powstanie pożaru. W zależności od wymagań, stałe samoczynne urządzenia gaśnicze można podzielić na: systemy wodne, systemy powietrzne lub systemy mieszane. Czynnikiem gaśniczym może być woda lub woda z domieszką środków pianotwórczych.

#### Stałe urządzenia gaśnicze pianowe

Stałe urządzenia gaśnicze pianowe mogą stanowić wyposażenie pomieszczeń technicznych w budynku. Rodzaj instalacji do wytwarzania i podawania piany jest uzależniony od wielkości obiektu, konstrukcji, funkcji oraz od rodzaju substancji stwarzającej zagrożenie pożarowe. Instalacje pianowe można podzielić na służące do: powierzchniowego podawania piany (np.

instalacje zraszaczowe/tryskaczowe, działka pianowe), podpowierzchniowego podawania piany oraz instalacje do semipodpowierzchniowego podawania piany [22].

#### Stałe urządzenia gaśnicze proszkowe

Gaśnicze urządzenia proszkowe mają za zadanie wprowadzić w obszar płomienia bardzo drobno zmielone substancje stałe (proste sole organiczne). Obłok pyłu proszkowego oddziaływuje na źródło pożaru zarówno chemicznie, jaki i fizycznie zakłócając przebieg spalania. Instalacje proszkowe mają ograniczone zastosowanie do ochrony pomieszczeń ze względu na to, że proszki nie utrzymują się wystarczająco długo w powietrzu.

#### Stałe urządzenia gaśnicze areozolowe

Działanie aerozolowych urządzeń gaśniczych opiera się na zasadzie przerwania łańcucha reakcji fizyko-chemicznych zachodzących podczas pożaru. Praktyczne zastosowanie znalazły urządzenia aerozolowe umożliwiające wytworzenie aerozolu na drodze pirotechnicznej (np. na bazie wodorowęglanu potasu). Zadziałanie aerozolowych systemów gaśniczych nie zmniejsza poziomu tlenu w powietrzu i pozostawia niewielką ilość zanieczyszczeń.

#### Hybrydowe urządzenia gaśnicze

W przypadkach szczególnych zagrożeń pożarowych mają zastosowanie kombinowane (hybrydowe) systemy gaśnicze. W praktyce spotykane są następujące rozwiązania:

1) hybrydowe instalacje pianowo-proszkowe,

2) hybrydowe instalacje wodno-gazowe (woda i gaz obojętny),

3) hybrydowe instalacje mgły wodnej i gazów.

Przeciwpożarowe urządzenia hybrydowe są rozwiązaniami nowymi, których skuteczność oraz niezawodność działania musi zostać każdorazowo potwierdzona na podstawie odpowiednich badań i testów na rzeczywistych obiektach.

#### 2.5.6. Urządzenia przeciwpożarowe ułatwiające akcję ratowniczo- gaśniczą

Wyżej wymienione stałe lub półstałe urządzenia przeciwpożarowe, wentylacja pożarowa itp. mają również za zadanie ułatwienie prowadzenia działań ratowniczogaśniczych w obiektach budowlanych, w których pojawił się pożar. W wybranych budynkach, przepisy techniczno-budowlane narzucają konieczność zainstalowania przeciwpożarowych wyłączników prądu elektrycznego oraz dźwigów dla ekip ratowniczych.

#### 2.5.7. Wybrane przykłady współdziałania urządzeń przeciwpożarowych w budynkach

Ogień, dym i gazy pożarowe stanowią duże zagrożenie dla życia i zdrowia użytkowników budynków. Filozofia współczesnej ochrony przeciwpożarowej opiera się na właściwym doborze oraz zapewnieniu poprawnego współdziałania różnych urządzeń przeciwpożarowych w budynku. Typowy scenariusz pożarowy opisuje jakościowo przebieg pożaru w czasie z uwzględnieniem głównych faz charakteryzujących rozwój pożaru i odróżniających go od innych pożarów. Scenariusz opisuje fazę zapalenia i rozwoju, fazę pełnego rozwoju pożaru, fazę zaniku oraz charakteryzuje środowisko budowlane z uwzględnieniem technicznych środków zabezpieczenia przeciwpożarowego w budynku oraz innych czynników wpływających na rozwój pożaru. Na poniższym rysunku (rys. 2.12) zaprezentowano poglądowy podział podstawowych elementów scenariusza pożarowego.



Rys. 2.12. Poglądowy podział elementów scenariusza pożarowego

Współdziałanie systemu awaryjnego oświetlenia ewakuacyjnego i systemu wentylacji oddymiającej (shevs)

Konieczność zapewnienia awaryjnego oświetlenia ewakuacyjnego w budynkach wynika z obowiązujących przepisów techniczno-budowlanych [6] i przepisów bhp, natomiast konieczność oznakowania dróg i wyjść ewakuacyjnych wynika z obowiązujących przepisów przeciwpożarowych [2].

Budynek, w którym zanik napięcia w elektroenergetycznej sieci zasilającej może spowodować zagrożenie życia lub zdrowia ludzi, poważne zagrożenie środowiska, a także znaczne straty materialne, należy zasilać co najmniej z dwóch niezależnych, samoczynnie załączających się źródeł energii elektrycznej, oraz wyposażać w samoczynnie załączające się oświetlenie awaryjne (zapasowe lub ewakuacyjne).

Podstawowym celem działania systemów awaryjnego oświetlenia ewakuacyjnego oraz oznakowania jest umożliwianie łatwej, pewnej i bezpiecznej ewakuacji ludzi z budynku [16]. Systemy awaryjnego oświetlenia ewakuacyjnego służą do zapewnienia niezbędnego poziomu oświetlenia po zaniku oświetlenia podstawowego. Podświetlane znaki maja za zadanie wskazywać kierunki ewakuacji a oświetlenie przeszkodowe, służyć uwidacznianiu przeszkód wynikających z układu architektoniczno-budowlanego budynku. W polskich normach zostały określone wymiary, treść znaków ewakuacyjnych i zasady ich rozmieszczania. W każdym miejscu drogi ewakuacyjnej powinien być widoczny przynajmniej jeden znak ewakuacyjny jednoznacznie określający kierunek ewakuacji [23], [24], [25]. Duże ilości dymu na drogach ewakuacyjnych stanowią ogromne niebezpieczeństwo dla ludzi oraz utrudniają ewakuacje ze względu na ograniczenie widoczności (w tym znaków ewakuacyjnych), znacznie obniżenie stężenia tlenu w powietrzu, oddziaływanie termicznie i toksyczne.

W pierwszej fazie pożaru czynnikiem stwarzającym zagrożenie jest ograniczenie widoczności. Dymy i gazy pożarowe w znacznym stopniu pochłaniają i rozpraszają światło emitowane przez elementy instalacji oświetleniowej.

W celu stworzenia bezpiecznych warunków ewakuacji i stabilnych warunków akcji ratowniczo-gaśniczej stosuje się systemy wentylacji pożarowej. Zapewnienie nawiewu odpowiedniej ilości powietrza zewnętrznego do strefy ewakuacji ludzi oraz odprowadzenia na zewnętrz budynku dymów i gorących gazów pożarowych pozwala na utrzymanie wymaganego zakresu widzialności oraz ograniczenie oddziaływania termicznego i toksycznego produktów spalania.

Rozcieńczone dymy i gazy pożarowe ograniczają widoczności na drogach ewakuacyjnych w znacznie mniejszym stopniu. Przyjmuje się, że bezpieczne warunki ewakuacji zostają zachowane, jeżeli występuje na wysokości mniejszej lub równej 1,8 m zadymienie ograniczające widoczność krawędzi elementów budowlanych i drzwi powyżej 10 m oraz temperatura nie wyższa niż 60°C [13].

# Współdziałanie dźwiękowego systemu ostrzegawczego i systemu wentylacji oddymiającej (shevs)

Dźwiękowe systemy ostrzegawcze mają za zadanie powiadomienie użytkowników za pomocą sygnałów tonowych i zrozumiałych komunikat głosowych o zaistniałym zagrożeniu oraz wskazanie sposobu ewakuacji z budynku.

Słyszalność sygnałów akustycznych generowanych przez dźwiękowy system ostrzegawczy powinna być wyższa niż poziom tła od 6 do 20 dB(A), ale maksymalny poziom dźwięku alarmu pożarowego nie może być wyższy niż 120 dB(A) (z ograniczeniem ekspozycji) [26].

Poziom dźwięków wytwarzany przez pracujący, pozbawiony tłumików akustycznych, system wentylacji pożarowej oddymiającej to poziom około 80-100 dB(A).

Na jakość pracy dźwiękowego systemu ostrzegawczego wpływa wiele czynników takich jak: zrozumiałość mowy, właściwości akustyczne wnętrza, rodzaj zastosowanych głośników oraz ustawienie głośników itp. Ze względu na konstrukcje wentylatorów oddymiających, ich parametry techniczne systemy wentylacji pożarowej przeważnie będą źródłem podwyższającym poziom dźwięku tła akustycznego.

Brak wzajemnej korelacji w zakresie zachowania optymalnych warunków pracy systemu wentylacji pożarowej oraz dźwiękowego systemu ostrzegawczego może doprowadzić do opóźnienia ewakuacji ludzi, utrudnienia ewakuacji lub przeprowadzenia niezgodnie z założeniami scenariusza, a tym samym stwarzać realne zagrożenie dla życia i zdrowia ludzi.

## Współdziałanie systemu ruchomych kurtyn dymowych i systemu wentylacji oddymiającej (shevs)

Jak już wspomniano wcześniej, podstawowym zadaniem systemów wentylacji pożarowej jest stworzenie warunków bezpiecznej ewakuacji. Na rozprzestrzenianie się dymów i gazów pożarowych w budynków ma wpływ szereg czynników, poczynając do czynników zewnętrznych (np. wiatr, różnica temperatur itp.), przez zastosowane rozwiązania architektoniczno-budowlane, rodzaj użytych materiałów budowlanych, szczelności przegród budowlanych, istniejące wyposażenie techniczne i instalacyjne budynku oraz czynniki organizacyjno-funkcjonalne.

W celu poprawy funkcjonowania systemów wentylacji pożarowej, w wielu budynkach zastosowanie znalazły systemy kurtyn dymowych. Podstawowa funkcją systemu stałych i ruchomych kurtyn dymowych jest kontrolowanie przemieszczania się dymów i gazów pożarowych (pożaru) w obrębie budynku. Opracowanie [27] rozróżnia dwa główne rodzaje kurtyn dymowych: stałe kurtyny dymowe (SSB) oraz ruchome kurtyny dymowe (ASB).

Współpraca systemu kurtyn dymowych z systemami wentylacji pożarowej, w większości praktycznych przypadków, sprowadza się do stworzenia przy pomocy kurtyn dymowych zbiornika dymu, w którym gromadzą się dymy i gorące gazy pożarowe. Żeby wypełnić to

zadanie, kurtyny dymowe musza być odporne na odchylenia boczne wywołane siłami wyporu gorących dymów i/lub siłami wywołanymi pracą wentylatorów oddymiających [27].

Dymy i gazy pożarowe, które mogą przepływać przez szczeliny kurtyn dymowych tworzących główny zbiornik dymu w trakcie unoszenia będą porywały powietrze. Może zaistnieć sytuacja, w której zostanie utworzona chłodniejsza warstwa dymu poza głównym zbiornikiem dymu. Przecieki dużych ilości dymu przez nieszczelności kurtyn dymowych (nie przebadanych wg wymagań [27]) tworzących zbiorniki dymu, a następnie opadanie schłodzonych dymów w kierunku dróg ewakuacyjnych mogą stanowić potencjalne zagrożenie dla ewakuujących się ludzi, jeśli nie zostały uwzględnione na etapie projektowania systemu wentylacji pożarowej.

Współdziałanie stałego samoczynnego urządzenia gaśniczego wodnego (instalacji tryskaczowej) i systemu wentylacji oddymiającej (shevs)

W przypadku wystąpienia pożaru w budynku zadania systemu wentylacji pożarowej i stałych samoczynnych urządzeń gaśniczych wodnych (na przykładzie instalacji tryskaczowej) mogą być zróżnicowane. Podstawowym celem działania stałej samoczynnej instalacji tryskaczowej jest możliwie wczesne wykrycie pożaru, gaszenie go lub utrzymywanie pod kontrolą, do czasu jego ugaszenie za pomocą innych środków [28]. Każda instalacja tryskaczowa służy również do zapewniania bezpieczeństwa ludziom. Jeżeli podstawowym celem działania instalacji tryskaczowej jest ochrona bezpieczeństwa ludzi wówczas powinna ona spełniać dodatkowe wymagania (np. zastosowanie tryskaczy szybkiego reagowania, specjalne rozwiązania w teatrach itp.). Instalacja tryskaczowa, oprócz niektórych wyjątków powinna obejmować swoim zasięgiem cały budynek.

System wentylacji pożarowej i system instalacji tryskaczowej powinny ze sobą współpracować, tak aby osiągnąć zadawalający poziom bezpieczeństwa warunków ewakuacji oraz możliwie szybko ugasić pożar. Niestety, wokół wzajemnego współdziałania systemów wentylacji pożarowej i systemów tryskaczowych nadal istnieje wiele kontrowersji [29]. Pomimo przeprowadzenia wielu badań, nie zostały stworzone jednoznaczne wytyczne współdziałania obu systemów. Kontrowersje budzą następujące fakty:

- 1. działanie systemów wentylacji pożarowej może opóźnić zadziałanie systemu tryskaczowego, ponieważ w wyniku rozcieńczania powietrzem zewnętrznym obniża się temperatura dymów i gazów pożarowych,
- 2. działanie systemów wentylacji pożarowej powoduje dostarczanie dużych ilości tlenu do budynku i źródła pożaru przez co przyczynia się do wzrostu mocy pożaru,
- opóźnione zadziałanie systemu tryskaczowego może spowodować brak możliwości ugaszenia pożaru w jego początkowej fazie rozwoju lub ograniczenie kontroli mocy pożaru,
- 4. zadziałanie systemu tryskaczowego na skutek odparowania rozpylonej wody i obniżenia temperatury dymu może pogarszać warunki ewakuacji,
- 5. zadziałanie systemu tryskaczowego w budynkach wyposażonych w grawitacyjny system wentylacji pożarowej (grawitacyjne odprowadzanie dymu i ciepła) może w pewnych warunkach obniżać szybkość i skuteczność odprowadzania dymów na zewnątrz budynku.

Aktualnie przyjmuje się zasadę, że systemy wentylacji pożarowej w budynku powinny zostać uruchomione możliwie najwcześniej bezpośrednio po wykryciu pożaru, żeby umożliwić ludziom bezpieczne opuszczenie budynku. Konfiguracja systemów tryskaczowych może być niezależna, ale powinna spełniać pewne wymagania zawarte na przykład w opracowaniu [28].

#### Współdziałanie stałych urządzeń gaśniczych gazowych i instalacji wentylacji

Stałe urządzenia gaśnicze gazowe mają szereg zalet, z których dwie są najważniejsze: brak przewodzenia prądu elektrycznego oraz całkowity brak zanieczyszczeń i uszkodzeń po zadziałaniu [30]. Stałe urządzenia gaśnicze gazowe znalazły praktyczne zastosowanie w gaszeniu pożarów w pomieszczeniach, w których znajdują się instalacje elektryczne lub inne instalacje prądowe, pomieszczeniach archiwów, pomieszczeniach służących do przechowywania cennych zabytków itp.

Wyładowanie gazów gaśniczych w pomieszczeniu, w którym wybuch pożar może powodować zagrożenie dla ludzi związane z obniżeniem stężenia tlenu, ale również w niektórych przypadkach oddziaływaniem produktów rozkładu termicznego. Skuteczność działania stałych gazowych systemów gaśniczych uzależnione jest od zachowania odpowiedniej szczelności chronionego pomieszczenia tak, aby można było uzyskać odpowiednie stężenie środka gaśniczego w okresie czasu niezbędnego do ugaszenia pożaru. Czas niezbędny na utrzymanie odpowiedniego stężenia gazu gaśniczego w chronionym pomieszczeniu nazywany jest czasem retencji. Czas retencji uzależniony jest od rodzaju i własności fizyko-chemicznych gazu gaśniczego, wymaganego stężenia gazu gaśniczego, szczelności przegród wydzielających chronioną przestrzeń, rodzaju pomieszczenia, rodzaju materiałów palnych oraz wentylacji. Największy wpływ na czas retencji mają dwa czynniki:

- 1. gęstość gazu gaśniczego,
- 2. nieszczelności przegród, a w szczególności ich wielkości i lokalizacja.

Ważną instalacją, która może pomóc w zmniejszeniu czasu retencji jest instalacja wentylacji. Gęstość gazowych środków gaśniczych, w przeważającej większości jest większa niż gęstość powietrza. Mają one zatem naturalną tendencje do opadania, zalegania w dolnej części pomieszczenia oraz ewentualnego wypływu przez nieszczelności na zewnątrz pomieszczenia. Taka sytuacja może spowodować brak możliwości utrzymania wymaganego stężenia gazu w górnych partiach pomieszczenia. Odpowiednio zaprojektowana i wykonana mechaniczna instalacja wentylacji może zapewnić właściwe wymieszanie gazów i szybsze osiągniecie zakładanych stężeń gaśniczych.

## 3. WARUNKI BEZPIECZNEJ EWAKUACJI Z BUDYNKU

#### 3.1. Rozwój pożaru w pomieszczeniach i jego opis

Pożar jest to niekontrolowane w czasie i przestrzeni, samopodtrzymujące się spalanie [31]. Inicjacja pożaru uzależniona jest od trzech podstawowych czynników: materiału palnego (paliwa), ciepła (zapłonu), utleniacza (najczęściej tlen zawarty w powietrzu). Rysunek 3.1. przedstawia tzw. trójkąt spalania.



Rys. 3.1. Czynniki niezbędne do wybuchu pożaru.

Opis rozwoju pożaru wymaga znajomości dużej liczby parametrów. Pożar w pomieszczeniu (rys. 3.2.) obejmuje wszystkie zjawiska związane z tworzeniem się i rozprzestrzenianiem strefy spalania (płomienia), powstawaniem gazowych produktów rozkładu termicznego (dymów i gazów pożarowych), wymianą ciepła i masy w samym pomieszczeniu i jego sąsiedztwie. Przestrzeń pożaru oraz zjawiska towarzyszące pożarowi można podzielić na:

- strefę spalania,
- strefę konwekcyjną,
- strefę zadymienia,
- strefę oddziaływania cieplnego.



30 sekund



180 sekund



75 sekund





135 sekund



**Rys. 3.2.** Poglądowe zdjęcia przedstawiające szybkość rozwoju pożaru w pomieszczeniu (źródło: www.bre.co.uk).

Analityczne modelowanie pożarów jest procesem bardzo złożonym, który wymaga przyjęcia wielu uproszczeń w zakresie fizykochemicznym i termodynamicznym. Uproszczony model wymiany energii i masy w trakcie pożaru w pomieszczeniu został przedstawiony na poniższym rysunku (rys.3.3).



Rys. 3.3. Model wymiany energii i masy w trakcie pożaru w pomieszczeniu [32]

W uproszczeniu bilans energetyczny pożaru można przedstawić następująco [32]:

$$\dot{h_c} - (\dot{h_l} + \dot{h_o} + \dot{h_w} + \dot{h_g} + \dot{h_s}) = 0$$
 (3.1)

gdzie:

 $\dot{h}_c$  – sumaryczny strumień ciepła uwalniany podczas pożaru z uwzględnieniem wszystkich zjawisk,

 $\dot{h}_{\rm l}$  – strumień ciepła wymiany gazowej przemieszczających się dymów i gazów pożarowych na drodze konwekcji,

 $\dot{h}_{o}$  - strumień ciepła przepływający przez istniejące w przegrodach budowlanych otwory na drodze promieniowania,

 $\dot{h}_{w}$  – strumień ciepła akumulowany przez przegrody budowlane na drodze konwekcji, promieniowania i przewodzenia,

 $\dot{h}_g$  – strumień ciepła gazów pożarowych zależny od temperatury otoczenia (np. wyrównywanie temperatur powietrza otaczającego pożar do temperatury dymów i gazów pożarowych),

 $\dot{h}_s$  – pozostałe strumienie ciepła nie wymienione powyżej (np. energia pochłonięta przez elementy wyposażenia pomieszczenia itp.)

Uproszczony bilans masowy pożaru [32]:

$$\dot{m_g} - (\dot{m_l} + \dot{R}) = 0 \tag{3.2}$$

gdzie,

mg - strumień masy gorących dymów i gazów pożarowych wypływających ze strefy pożaru,

m<sub>l</sub> – strumień masy powietrza napływającego do strefy pożaru,

Ř – strumień masy produktów rozkładu termicznego, w szczególności tzw. pirolizy (tj. rozkładu termicznego substancji bez dostępu tlenu).



Rys. 3.4. Fazy rozwoju pożaru w pomieszczeniu w zależności od czasu

Na powyższym rysunku (rys.3.4) można wyróżnić następujące fazy pożaru:

- faza I faza bezpłomieniowa, na którą składają się zapłon i pożar bezpłomieniowy. Długość tej fazy jest bardzo często trudna do oszacowania,
- faza II zwana fazą przedrozgorzeniową. Średnia temperatura gazów i dymów pożarowych jest niska. Strefa spalania znajduję się blisko miejsca zapłonu.
- faza III zwana fazą rozgorzeniową (ang. flashover). Faza bardzo krótka i polega na szybkim rozprzestrzenianiu się płomienia z miejsca spalania do spalania w całej objętości wszystkich palnych materiałów w pomieszczeniu [33].
- faza IV faza po rozgorzeniowa. Czas trwania zależy od obciążenia ogniowego oraz warunków wentylacji. Pożar jest w pełni rozwinięty. Wszystkie materiały palne znajdujące się w pomieszczeniu ulegają spaleniu, płomienie wypełniają całe pomieszczenie a temperatura gazów i dymów pożarowych osiąga maksymalną wartość.
- faza V faza gaśnięcia. Pożar zaczyna słabnąć do chwili, gdy wszystkie palne materiały ulegną całkowitemu spaleniu.

Podstawowymi parametrami opisującymi projektowany pożar [34] są:

- 1. obciążenie ogniowe całkowita energia termiczna, która może zostać uwolniona w przypadku pożaru,
- 2. szybkość wydzielania ciepła (tzw. moc pożaru) która charakteryzuje tempo rozwoju pożaru,
- 3. maksymalne pole powierzchni pożaru,
- 4. szybkość wydzielania dymów i gazów pożarowych,
- 5. szybkość wydzielania się toksycznych produktów spalania,
- 6. czas wystąpienia kluczowych faz takich jak pełne rozgorzenie (flashover).

Na poniższym rysunku (rys. 3.5) przedstawiono wykres fazy rozwoju pożaru z uwzględnieniem poglądowej wielkości emisji gorących dymów i gazów w trakcie pożaru w pomieszczeniu.



**Rys. 3.5.** Wykres przedstawiający fazy rozwoju pożaru i poglądową wielkość emisji gorących dymów i gazów pożarowych w trakcie pożaru w pomieszczeniu w zależności od czasu

Obciążenie ogniowe określa wielkość dostępnej energii zależnej od wyposażenia i składowanych materiałów w budynku, natomiast temperatura dymów i gazów pożarowych zależy przede wszystkim od szybkości (intensywności) wydzielania ciepła oznaczanego jako HRR (ang. heat release rate) lub RHR (ang. rate of heat release). Współczynnik szybkości wydzielania ciepła jest miarą intensywności pożaru w pomieszczeniu i odpowiada całości energii uwolnionej do otoczenia podczas pożaru (hc). Zatem współczynnik szybkości wydzielania ciepła jest również miarą określającą dynamikę przyrostu temperatury oraz szybkość rozprzestrzeniania się dymów i gazów pożarowych. Przykładowe wartości szybkości wydzielania ciepła w zależności od sposobu użytkowania pomieszczenia podano w tab. 3.1.

Rodzaj pomieszczenia	Szybkość rozwoju pożaru	Czas wymagany do osiągniecia szybkości wydzielania ciepła o wartości 1MW [s]	Maksymalna szybkość wydzielania ciepła RHR [kW/m <sup>2</sup> ]
Mieszkanie	średnia	300	250
Pokój w szpitalu	średnia	300	250
Pokój w hotelu	średnia	300	250
Biblioteka	duża	150	500
Biuro	średnia	300	250
Sala lekcyjna	średnia	300	250
Centrum handlowe	duża	150	500
Teatr, kino	duża	150	500
Komunikacja ogólnodostępna	mała	600	250

 Tab. 3.1. Rozwój pożaru oraz szybkość wydzielania ciepła w pomieszczeniach o różnym przeznaczeniu dla pożaru kontrolowanego za pomocą paliwa [33]

Uogólniając rozważania, rozwój pożaru w fazie II (przed rozgorzeniem) rozpatruje się jako dwa odrębne warianty. W pierwszym wariancie zakłada się, że moc pożaru osiąga maksymalną wartość bez ograniczenia ilości tlenu do spalania. Wówczas szybkości wydzielania ciepła podczas pożaru zależy wyłącznie od ilości dostępnego paliwa. Takie pożary określa się jako pożary kontrolowane paliwem. Drugi wariant rozwoju pożaru zakłada ograniczenia dostępności tlenu niezbędnego do podtrzymania procesu spalania (np. ograniczona wielkość otworów w przegrodach budowlanych itp.). Z kolei takie pożary określa się jako kontrolowane przez wentylację. Zarówno w pierwszym i drugim wariancie rozwoju pożaru w fazie II może on przejść do fazy III, czyli rozgorzenia. Rysunek 3.6 graficznie przedstawia omówione warianty.


Rys. 3.6. Poglądowy wykres zmiany mocy pożaru w funkcji czasu

Ustalenie parametrów projektowanego pożaru, przy których powinno zostać zagwarantowane poprawne działanie systemów wentylacji pożarowej zazwyczaj dokonywane jest na drodze analiz statystycznych (podejście probabilistyczne). Przykłady wartości parametrów pożarów referencyjnych zostały podane w poniższej tablicy (tab. 3.2.).

Rodzaj pomieszczenia	Pole powierzchni pożaru [m <sup>2</sup> ]	Szybkości wydzielania ciepła na jednostkę powierzchni [kW/m²]
Powierzchnia handlu detalicznego (brak instalacji tryskaczowej)	całe pomieszczenie	1200
Powierzchnia handlu detalicznego (standardowa instalacja tryskaczowa)	10	625
Pokój hotelowy (brak instalacji tryskaczowej)	całe pomieszczenie	100
Pokój hotelowy (standardowa instalacja tryskaczowa)	2	250
Biura (standardowa instalacja tryskaczowa)	16	225
Biura (brak instalacji tryskaczowej. Obciążenie ogniowe kontrolowane)	47	255

Tabl. 3.2. Wybrane parametry pożarów referencyjnych o stałej mocy w oparciu o [20].

Takie podejście sprawdza się dla typowych pomieszczeń, w których można oczekiwać podobnych parametrów rozwoju pożaru tj. wielkości obciążenia ogniowego, szybkości wydzielania ciepła, gęstości obciążenia ogniowego itp.

# 3.2. Modele rozwoju pożaru

Modele pożarów umożliwiają stosunkowo dokładną analizę i weryfikację warunków rozwoju pożaru w pomieszczeniach i obiektach budowlanych. Modele rozwoju pożaru określają fizykochemiczne i termiczne procesy zachodzące podczas pożaru. Modele rozwoju pożarów można podzielić na modele fizyczne (eksperymentalne) i matematyczne.

Zazwyczaj modele fizyczne odzwierciedlają sytuacje pożarowe w skali rzeczywistej lub mniejszej skali geometrycznej. Badania modelowe w skali rzeczywistej są bardzo kosztowne i wykonywane są aktualnie przede wszystkim w celach weryfikacyjnych (walidacyjnych), badawczych oraz w szczególnych przypadkach. Zależności między parametrami fizykochemicznymi spalania, przepływami turbulentnymi, w przypadku zmiennej ilości tlenu w zmiennych warunkach termicznych są trudne do prawidłowego odwzorowania w skalach modelowych. Różnorakie fizykochemiczne oddziaływania w środowisku pożaru oraz wzrost mocy obliczeniowej komputerów sprawiły, że w praktyce inżynierskiej modele matematyczne lepiej zdają egzamin niż modele fizyczne.

Modele matematyczne rozwoju pożaru można podzielić na modele probabilistyczne (statystyczne) i deterministyczne. Modele probabilistyczne opierają się na założeniu, że pożar rozpatrywany jest jako seria kolejnych zdarzeń następujących po sobie z pewnym prawdopodobieństwem [35]. Modele deterministyczne oparte są na prawach fizycznych, termodynamicznych i chemicznych. W praktyce wyróżnia się następujące metody obliczania rozwoju pożaru:

- modele analityczne,
- modele strefowe,
- modele polowe.

Na poniższym rysunku (rys. 3.7.) został przedstawiony poglądowy podział modeli rozwoju pożaru w pomieszczeniach [14].



Rys. 3.7. Podział modeli rozwoju pożaru w pomieszczeniach

#### Modele analityczne

Modele analityczne opierają się na założeniu, że przebieg poszczególnych faz rozwoju pożaru i innych procesów można przedstawić za pomocą równań opisujących zależność zachodzące podczas pożaru np. przyrost temperatury dymów i gazów pożarowych w określonym czasie.

#### Modele strefowe

Modele strefowe opierają się na hipotezie, że temperatura jest jednakowa w każdej z wyznaczonych stref. W przypadku typowego pożaru w pomieszczeniu, w fazie przed rozgorzeniem, występuje nagromadzenie dymów i gazów pożarowych w górnej części pomieszczenia, poniżej sufitu. Natomiast poniżej gorącej warstwy dymów znajduje się warstwa w miarę czystego powietrza o niższej temperaturze. Opisany powyżej model pożaru nazywany jest modelem dwustrefowym. Modele strefowe można podzielić na modele jednostrefowe oraz modele wielostrefowe.

Modele jednostrefowe charakteryzują się tym, że w pomieszczeniu, w którym wybuch pożar zakłada się jednakową temperaturę dla całego pomieszczenia. Graficzne odwzorowanie modelu jednostrefowego przedstawiono na rys. 3.8.



Rys. 3.8. Przykład jednostrefowy model pożaru.

W modelach strefowych równania matematyczne umożliwiają przeprowadzenie obliczeń dla każdej zdefiniowanej strefy (rys. 3.9.). Oprócz obliczeń określających szybkość przyrostu w czasie temperatury dymów i gazów pożarowych modele strefowe można również wykorzystywać do szacowania poziomu bezpieczeństwa w budynkach przez analizę takich parametrów jak: szybkości rozprzestrzeniania się dymów, stopień koncentracji toksycznych gazów, gęstości dymów, wartości promieniowania cieplnego itp.



Rys. 3.9. Przykład wielostrefowego modelu pożaru.

## Modele polowe

Polowe modele rozwoju pożarów charakteryzują się znacznym stopniem skomplikowania. W odróżnieniu od modeli strefowych przestrzeń poddana analizie jest dzielona na małe obszary przestrzenne (komórki), dla których numerycznie rozwiązywane są układy równań różniczkowych. Analizie w funkcji czasu poddawana jest przestrzeń pożaru (w osiach x,y,z) i zdefiniowane strefy sąsiednie, ale również składowane materiały palne, elementy przegród budowlanych itp. Poglądowe, graficzne odwzorowanie modelu polowego przedstawiono na rys. 3.10. Najbardziej znanym modelem polowym obecnie wykorzystywanym w zagadnieniach analizy rozwoju pożaru jest model polowy CFD (Computational Fluid Dynamics – Numeryczna Mechanika Płynów). Przedmiotowy model opiera się na równaniach mechaniki płynów oraz termodynamiki.



Rys. 3.10. Przykład polowego modelu pożaru.

Modele CFD zawierające charakterystyki rozwoju pożarów zostały zaimplementowane w wielu programach komputerowych. Użycie nawet uproszczonych modeli polowych wymaga zdefiniowania bardzo wielu parametrów wyjściowych, takich jak:

- 1. dokładne odwzorowanie geometrii obiektu budowlanego,
- 2. wybór i dopasowanie siatki obliczeniowej,
- 3. parametry brzegowe tj. ciśnienie, temperatura, prędkości przepływu powietrza itp.
- 4. parametry materiałów budowlanych,
- 5. parametry pożaru,
- 6. parametrów rozwoju pożaru w fazie stałej,
- 7. reakcji urządzeń gaśniczych
- 8. parametrów pracy i lokalizacji elementów instalacji wentylacji pożarowej itp.

Większy stopień złożoności i szczegółowości opisywanych zjawisk sprawia, że modele polowe są ogólnie bardziej uniwersalnym narzędziem niż modele strefowe. Rozwój ww. modeli polega głównie na uwzględnianiu większej liczby zjawisk fizycznych i reakcji chemicznych a także dostosowania modeli do konkretnych zastosowań inżynierskich [36].

# 3.3. Przegląd wymagań zapewniających bezpieczną ewakuację

Minimalne wymagania w zakresie bezpieczeństwa pożarowego w odniesieniu do budynków nowobudowanych i modernizowanych zostały określone w obowiązujących przepisach techniczno-budowlanych i przepisach przeciwpożarowych. O stanie bezpieczeństwa ewakuujących się ludzi decydują następujące czynniki:

- zasięg widzialności (stopień zadymienia),
- temperatura w pomieszczeniach,
- geometria i szybkość rozprzestrzeniania się płomieni i dymu,
- własności termiczne i fizykochemiczne, stężenie, toksyczność dymów i gazów pożarowych,
- korozyjność produktów spalania itd.

Czynniki te odgrywają różną rolę w zależności od rodzaju i przeznaczenia budynku. Poziom bezpieczeństwa pożarowego w danej chwili określony jest przez stan konstrukcji i stan środowiska wewnętrznego budynku. Krytycznym kryterium dla życia i zdrowia ludzi jest czas ewakuacji. Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji jest to przedział czasu od momentu zapłonu do momentu kiedy warunki środowiska wewnątrz budynku osiągną takie wartości, że samodzielna ewakuacja przestanie być możliwa. Na rysunku 3.11. przedstawiono poglądowy wykres reakcji systemów przeciwpożarowych oraz ewakuacji w funkcji czasu.



**Rys. 3.11.** Poglądowy wykres reakcji systemów przeciwpożarowych oraz ewakuacji w funkcji czasu (źródło: opracowanie Brandschutz Consult 2009r.)

Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji powinien być zawsze mniejszy od dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji w danym obiekcie. Zbiorcze zastawienie parametrów zapewniających bezpieczną ewakuację ludzi w oparciu o dostępne dane i wytyczne zostały podane na poniższym rysunku (rys. 3.12.) oraz w tablicy (tabl. 3.3.).



Oznaczenia:

H<sub>pub</sub>, H<sub>npub</sub> - wysokość warstwy wolnej od dymu,

- $T_L$  temperatura warstwy wolnej od dymu,
- T<sub>D</sub> średnia temperatura warstwy dymu,
- Q<sub>P</sub> gęstość strumienia promieniowania cieplnego,
- K<sub>E</sub> współczynnik ekstynkcji (zanikania) dymu,
- W<sub>L</sub> zadymienie ograniczające widzialność w strefie warstwy wolnej od dymu,
- w<sub>p</sub> prędkość powietrza w strefie warstwy wolnej od dymu,
- PL wartość podciśnienia powietrza w strefie warstwy wolnej od dymu,
- S<sub>CO</sub> stężenie CO w strefie warstwy wolnej od dymu,
- $S_{\text{CO2}}$  stężenie  $\text{CO}_2\,w$  strefie warstwy wolnej od dymu,
- $S_{\mbox{\scriptsize HCN}}$  stężenie HCN (cyjanowodór) w strefie warstwy wolnej od dymu,
- $S_{\mathrm{O2}}$  stężenie  $\mathrm{O}_2\,w$  strefie warstwy wolnej od dymu.

Rys. 3.12. Pożar w pomieszczeniu - warunki bezpiecznej ewakuacji

Parametr	Oznaczenie	Minimalna wartość graniczna	Wartość bezpieczna	Zalecenia KG PSP
Wysokość warstwy wolnej od dymu	H <sub>pub</sub> H <sub>npub</sub>	> 1,5 m (VdS) H <sub>pub</sub> > 3,0 m (CEN/BS) H <sub>npub</sub> > 2,5 m (CEN/BS)	> 1,8 m (VdS) H <sub>pub</sub> > 3,0 m (CEN/BS) H <sub>npub</sub> > 2,5 m (CEN/BS)	> 1,8 m
Temperatura warstwy wolnej od dymu	T <sub>L</sub>	< 65 °C (VdS) < 50 °C (vfdb2009)* < 50 °C (vfdb2013)*	< 50 °C (VdS) < 45 °C* (vfdb2009) < 45 °C* (vfdb2013) < 50 °C (SWKI2013)	< 60 °C
Średnia temperatura warstwy dymu	T <sub>D</sub>	< 300 °C (DIN) < 200 °C (CEN/BS) < 200 °C (SWKI2013)	< 150 °C (VDI)	-
Gęstość strumienia promieniowania cieplnego	Qp	<2,5 kW/m <sup>2</sup> (vfdb2009)* <2,5 kW/m <sup>2</sup> (vfdb2013)* <2,0 kW/m <sup>2</sup> (SWKI2013)	<1,7 kW/m <sup>2</sup> (vfdb2009)* <1,7 kW/m <sup>2</sup> (vfdb2013)*	-
Współczynnik ekstynkcji (zanikania) dymu	K <sub>E</sub>	$\leq 0,23 \text{ m}^{-1} \text{ (vfdb2009)}*$	$ \leq 0.46 \text{ m}^{-1} \text{ (vfdb2009)}^{*} \\ \leq 0.30 \text{ m}^{-1} \text{ (SWKI2013)} $	-
Ograniczenie widzialność w strefie warstwy wolnej od dymu	WL	> 10 m (VdS) 10÷20 m (vfdb2009) 10÷20 m (vfdb2013)	> 20 m (VdS) 10÷20 m (vfdb2009) 10÷20 m (vfdb2013)	> 10 m
Prędkość powietrza w strefie warstwy wolnej od dymu	Wp	< 5 m/s (CEN/BS)	< 1 m/s (CEN/BS)	-
Wartość podciśnienia powietrza w strefie warstwy wolnej od dymu	PL	< 75 Pa (CEN/BS)	40 Pa (CEN/BS)	-
Stężenie CO w strefie warstwy wolnej od dymu	S <sub>CO</sub>	< 1400 ppm (VdS) < 500 ppm (vfdb2009)* < 500 ppm (vfdb2013)*	< 700 ppm (VdS) < 100 ppm (vfdb2009)* < 100 ppm (vfdb2013)* < 300 ppm (SWKI2013)	-
Stężenie CO <sub>2</sub> w strefie warstwy wolnej od dymu	S <sub>CO2</sub>	<6% (VdS) <3% (vfdb2009)* <3% (vfdb2013)*	<5% (VdS) <1% (vfdb2009)* <1% (vfdb2013)* <1% (SWKI2013)	-
Stężenie HCN (cyjanowodór) w strefie warstwy wolnej od dymu	S <sub>HCN</sub>	< 40 ppm (vfdb2009)* < 40 ppm (vfdb2013)*	< 8 ppm (vfdb2009)* < 8 ppm (vfdb2013)* < 30 ppm (SWKI2013)	-
Stężenie O <sub>2</sub> w strefie warstwy wolnej od dymu	S <sub>O2</sub>	> 12% (VdS)	> 14% (VdS) > 15% (SWKI2013)	-

Tabl. 3.3. Zestawienie porównawcze parametrów zapewniających bezpieczną ewakuację ludzi

Objaśnienia do tablicy:

\* - wartości uzależnione od czasu ekspozycji,

KG PSP – Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej

BS – norma British Standard BS 7346-4

CEN - Raport Techniczny Komitetu CEN/TC CEN/TR 12101-5

DIN – norma Deutsches Institut für Normung DIN 18232

VdS- norma VdS Schadenverhütung GmbH VdS 2827 (Vertrauen durch Sicherheit)

Vfdb - norma Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. Vfdb TB 04-01:2009

Vfdb - norma Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. Vfdb TB 04-01:2013

VDI – norma Verein Deutsche Ingenieure VDI 6019

SWKI – Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren

Jeżeli celem ochrony przeciwpożarowej jest ochrona ludzi to czynne techniczne środki zabezpieczenia przeciwpożarowego powinny zostać tak zaprojektowane i wykonane, aby co najmniej zagwarantować utrzymanie parametrów bezpiecznej ewakuacji przez ustalony dostępny czas bezpiecznej ewakuacji.

## 3.4. Metody zapewnienia warunków bezpiecznej ewakuacji

Jak już wspomniano, jednym z podstawowych warunków zapewniających bezpieczną ewakuację jest możliwie wczesne wykrycie powstałego pożaru. Wykrycie oraz zlokalizowanie pożaru decyduje o szybkości uruchomieniu istniejących w budynku czynnych technicznych środków zabezpieczenia przeciwpożarowego tj. systemu powiadamiania użytkowników o konieczności ewakuacji, systemu kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła, systemu zamknięć przeciwpożarowych na granicach stref pożarowych itp.

Ze względu na uwarunkowania funkcjonalne, konstrukcyjno-budowlane, techniczne itp. w bardzo wielu budynkach w celu zapewniania odpowiednich warunków ewakuacji w wymaganym czasie konieczne jest zaprojektowanie i wykonanie systemu kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła tj. między innymi instalacji wentylacji oddymiającej.

W rozporządzeniu [6] zostały przywołane następujące określenia:

- 1. samoczynne urządzenia oddymiające (instalacja wentylacji oddymiającej),
- 2. urządzenia służące do usuwania dymów,
- 3. urządzenia zapobiegające zadymieniu,
- 4. urządzenia zabezpieczające przed zadymieniem.

Zabezpieczenie przed zadymieniem dróg ewakuacyjnych jest zdefiniowane jako zabezpieczenie przed utrzymywaniem się na drogach ewakuacyjnych dymu w ilości, która ze względu na ograniczenia widoczności, toksyczność lub temperaturę uniemożliwia bezpieczną ewakuację (patrz §2 ust.1 punkt 10 [2]). Zgodnie z wymaganiami §270 ust.1 punkt 1 [6] instalacja wentylacji oddymiającej powinna usuwać dym z intensywnością zapewniającą, że w czasie potrzebnym do ewakuacji ludzi na chronionych przejściach i drogach ewakuacyjnych nie wystąpi zadymienie lub temperatura uniemożliwiająca bezpieczną ewakuację. Pozostałe określenia nie zostały doprecyzowane.

W normie PN-EN 12101-2 [4] zawarto definicję systemów:

- 1. *systemu kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła* tj. takiego zestawu elementów zamontowanych w obiekcie budowlanym mającego za zadanie ograniczenie skutków oddziaływania dymu i ciepła wydzielanych podczas pożaru,
- 2. *systemu odprowadzania dymu i ciepła* tj. systemu kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła, który usuwa dym i ciepło wydzielane podczas pożaru,
- 3. *systemu wentylacji oddymiającej* (ang. akronim shevs) tj. łącznie dobranych elementów do odprowadzania dymu i ciepła, którego zadaniem jest utrzymanie warstwy ciepłych gazów pożarowych, unoszących się ponad chłodniejszym, czystym powietrzem.

Z kolei w normie PN-EN 12101-6 [17] zawarto definicję system różnicowania ciśnień tj. systemu wentylatorów, przewodów wentylacyjnych, klap oraz innych elementów zainstalowanych w celu utworzenia w strefie objętej pożarem ciśnienia niższego niż w przestrzeni chronionej. Różnicowanie ciśnień może być prowadzone dwoma zasadniczymi metodami:

- 1. podwyższanie ciśnienia utrzymywanie nadciśnienia w przestrzeniach chronionych,
- 2. obniżanie ciśnienia usuwanie gorących gazów ze strefy objętej pożarem przy ciśnieniu niższym niż w sąsiedniej chronionej przestrzeni.

W literaturze przedmiotu termin systemy wentylacji pożarowej (ang. smoke and heat control systems) oznacza systemy wentylacji, których zadaniem jest kontrola rozprzestrzeniana dymu i ciepła.

Zatem pod pojęciem systemu wentylacji pożarowej można rozumieć kompletny system kontroli nad rozprzestrzenianiem się dymów i ciepła w budynku, który może między innymi składać się z:

- 1. systemu odprowadzania dymu i ciepła lub/i systemu wentylacji oddymiającej,
- 2. systemu różnicowania ciśnień.

Na poniższym rysunku (rys. 3.13) został przedstawiony poglądowy podział systemów wentylacji pożarowej, natomiast na kolejnym rysunku (rys.3.14) pokazano przykładowy widok pomieszczenia z pracującą instalacją wentylacji oddymiającej i przy jej braku.



Rys. 3.13. Poglądowy podział systemów wentylacji pożarowej



a) Mechaniczny system wentylacji oddymiającej



b) Brak systemu wentylacji oddymiającej



Aktualnie stosowane rozwiązania techniczne ograniczające rozprzestrzenianie się dymów oraz ograniczające oddziaływanie gorących dymów i gazów pożarowych po wykryciu pożaru w budynku można podzielić pod względem funkcjonalnym na cztery główne grupy [17]:

- 1. system wykorzystujący odpowiednio zaprojektowane przegrody budowlane, kurtyny dymowe itp. umożliwiający gromadzenie dymów i gazów pożarowych w zamkniętej części budynku, przez którą nie jest prowadzona ewakuacja,
- 2. system umożliwiający celowe mieszanie doprowadzanego czystego powietrza z gorącymi dymami i gazami pożarowymi w celu zmniejszenia potencjalnych zagrożeń,
- 3. system (system wentylacji oddymiającej) zapewniający stabilne rozdzielanie między warstwą gorących dymów i gazów pożarowych utrzymujących się w górnej części pomieszczenia a dolną częścią pomieszczenia, w której prowadzona jest ewakuacji oraz działania ratowniczo-gaśnicze. Takie rozwiązanie wymaga ciągłego doprowadzania powietrza zewnętrznego oraz odprowadzania gorących dymów i gazów pożarowych na zewnątrz budynku,
- 4. system różnicowania ciśnień z podwyższaniem lub obniżaniem ciśnienia.

Na dostępny czas ewakuacji ludzi z budynku, poza czasem wykrycia i alarmowania, mają wpływ przede wszystkim rodzaj obiektu budowlanego, rzeczywista długość przejść i dojść ewakuacyjnych oraz liczba i zdolność do samodzielnego poruszania się użytkowników obiektu.

Aktualnie obowiązujące przepisy techniczno-budowlane [6] pozwalają na złagodzenie wymagań technicznych w budynkach wyposażonych w samoczynne urządzenia oddymiające uruchamiane za pomocą systemu wykrywania dymu. W zależności od ustaleń [6] złagodzenia mogą dotyczy wielkości strefy pożarowej, długości przejścia i dojścia ewakuacyjnego itp.

Jak wspomniano wcześniej istnieją normy i raporty techniczne (między innymi [20], [21]), które określają metodykę postępowania przy ustalaniu założeń, metodykę przeprowadzania obliczeń umożliwiających zwymiarowanie poszczególnych elementów instalacji wchodzących w skład systemu wentylacji pożarowej w budynku.

Przykładowo, zgodnie z obowiązującymi przepisami techniczno-budowlanymi [6] w ewakuacyjnych klatkach schodowych części budynków powinny być stosowane urządzenia zapobiegające zadymieniu lub służące do usuwania dymu. Urządzeniami służącymi do usuwania dymu z klatek schodowych są klapy dymowe umieszczone zazwyczaj na dachu klatki schodowej. Klapy dymowe są skutecznym zabezpieczaniem do chwili, w której następuje ochłodzenie dymu i zminimalizowanie zjawiska termicznego wypływu dymu na skutek różnicy gęstości. Zasady rozmieszania klap dymowych opisane są w normie PN-B-02877-4 [18]. Zasady budowy klap dymowych i sposoby ich testowania opisane są w normie EN 12101-2 [4].

Zapobieganie zadymieniu ewakuacyjnych klatek schodowych polega na zapobieganiu przed przedostawaniem się dymu do wnętrza klatki schodowej. Najskuteczniejszą metodą realizacji tego postulatu jest wytworzenie w klatce schodowej nadciśnienia przy pomocy wentylatora (system różnicowania ciśnień z podwyższaniem ciśnienia).

Systemy różnicowania ciśnień zapobiegające i zabezpieczające przed zadymieniem zostały opisane w normie PN-EN 12101-6 "Systemy kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła. Część 6: Wymagania techniczne dotyczące systemów różnicowania ciśnień. Zestawy urządzeń" [17].

W przedmiotowej normie dokonano podziału systemów kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła wykorzystującego różnicę ciśnień w zależności od wartości ciśnienia (systemy podwyższania ciśnienia i systemy obniżania ciśnienia), w zależności od przewidywanego sposobu ewakuacji ludzi, w zależności od rodzaju i funkcji budynku, w zależności od wyposażenia technicznego budynku oraz w zależności od sposobu prowadzenie akcji ratowniczo-gaśniczej. Podstawowe cechy i wymagania dotyczące systemów różnicowania ciśnień dla przypadku ewakuacji określono między innymi przez:

- 1. kryterium minimalnego przepływu powietrza w otwartych drzwiach między pomieszczeniem użytkowym a ewakuacyjną klatką schodową,
- 2. kryterium minimalnego przepływu powietrza w otwartych drzwiach między przedsionkiem przeciwpożarowym a pomieszczeniem użytkowym objętym pożarem,
- 3. kryterium minimalnej różnicy ciśnień przy zamkniętych drzwiach ewakuacyjnej klatki schodowej,
- 4. kryterium różnicy ciśnień przy wybranych otwartych drzwiach między pomieszczeniem użytkowym a ewakuacyjną klatką schodową,
- 5. kryterium siły otwierającej drzwi itp.

Idea działania systemów różnicowania ciśnień z podwyższaniem ciśnienia opiera się na nawiewie mechanicznym powietrza zewnętrznego do przestrzeni chronionej w takiej ilości, aby zabezpieczyć tą przestrzeń przed napływem dymów i gazów pożarowych z przestrzeni pomieszczenia użytkowego objętego pożarem. Warunkiem poprawności działania systemu jest usuwanie na zewnątrz budynku dymów i gazów pożarowych tak, aby zapewnić ciągłość kierunku przepływu powietrza zewnętrznego. Usuwanie zadymionego powietrza może być realizowane przez mechaniczną instalację oddymiającą lub systemy grawitacyjnego odprowadzania dymów.

Ustalenie podstawowych założeń projektowych oraz późniejsze zwymiarowanie systemów wentylacji oddymiającej wymaga pokonania kilku etapów:

### <u>Etap I:</u>

- 1. ustalenie przeznaczenie obiektu, poszczególnych pomieszczeń i ich sposób użytkowania,
- 2. zdefiniowanie rodzaju i ilości użytkowników,
- 3. ustalenie przyjętych rozwiązań architektoniczno-budowlanych i konstrukcyjnych,
- 4. ustalenie obligatoryjnych rozwiązań w zakresie technicznych środków zabezpieczenia przeciwpożarowego,

### Etap II:

5. zdefiniowanie celów ochrony przeciwpożarowej,

<u>Etap III:</u>

- 6. ustalenie wymagań przyjętych scenariuszy pożarowych, w tym charakterystyk rozwoju pożaru i parametrów krytycznych,
- 7. zdefiniowanie i celów działania systemów wentylacji oddymiającej takich jak:
  - a) zabezpieczenie przed zadymieniem dróg ewakuacyjnych,
    - b) kontrola temperatury dymów i gazów pożarowych,
    - c) kontrola rozprzestrzeniania się dymów i gazów pożarowych,
    - d) ochrona mienia,
    - e) wspomaganie akcji ratowniczo-gaśniczej,

### Etap IV:

- wybór rodzaju systemu wentylacji oddymiającej dla poszczególnych stref obiektu z uwzględnieniem współdziałania z innymi systemami wentylacji pożarowej i instalacjami,
- 9. wykonanie obliczeń analitycznych zgodnie z procedurami projektowymi określonych w normach i raportach technicznych, takich jak np.: PN-B-02877-4 [18], CEN/TR 12101-5 [20], VDI 6019 [37], NFPA 204 [38], NFPA 92B [39] itp.

- 10. projektowe ustalenie sposobu organizacji kontroli rozprzestrzeniania się dymu, ciepła i innych parametrów krytycznych w zależności od przyjętych celów ochrony, rozwiązań architektoniczno-budowlanych i otrzymanych wyników obliczeń przez określenie:
  - a) lokalizacja i wielkość zbiorników dymu,
  - b) lokalizacja i wielkości otworów napływu powietrza kompensacyjnego,
  - c) parametrów technicznych, lokalizacji instalacji i urządzeń wentylacji oddymiającej,
  - d) sekwencji zadziałania instalacji i urządzeń wentylacji pożaru.

# Etap V:

- 11. ewentualna weryfikacja i/lub optymalizacja przyjętych rozwiązań projektowych w oparciu o zwalidowane modele rozwoju pożaru (modele fizyczne lub matematyczne),
- 12. niezależna weryfikacja przyjętych rozwiązań projektowych.

Niezwykle istotną częścią procesu wymiarowania systemów wentylacji oddymiającej jest prawidłowe określenie przewidywanej mocy pożaru, w tym części konwekcyjnej, rodzaju generowanej kolumny konwekcyjnej dymu oraz obliczeń związanych z warstwą gorących dymów i gazów pożarowych zbierających się pod stropem pomieszczenia.

# 4. STAN WIEDZY W ZAKRESIE INSTALACJI WENTYLACJI POŻAROWEJ I MGŁY WODNEJ

# 4.1. Podstawowe zależności

System wentylacji oddymiającej służy do usuwania na zewnątrz obiektów budowlanych powstałych w czasie pożaru dymów i gazów pożarowych. Podstawowym celem działania systemu wentylacji oddymiającej jest zabezpieczenie przed zadymieniem dróg ewakuacyjnych oraz ochrona konstrukcji budynku.

Sposób funkcjonowania systemu wentylacji oddymiającej powinien gwarantować, że w określonym czasie zespół zjawisk fizycznych i fizykochemicznych występujących w czasie pożaru będzie znajdował się w stanie względnej równowagi. Dobór poszczególnych elementów systemu powinien zapewniać stałe odprowadzanie gorących dymów i gazów pożarowych z górnej części pomieszczenia i dostarczanie powietrza zewnętrznego do dolnej części pomieszczenia. System powinien zapewniać stabilność i brak mieszania górnej warstwy gorących dymów i gazów pożarowych unoszących się ponad chłodniejszą i czystą warstwą dolną. Parametry dymu i gorących gazów pożarowych wpływających do górnej warstwy zależą w głównej mierze od:

- miejsce powstania pożaru w stosunku do rozmieszczenia materiał palnych,
- rodzaju i ilości materiałów palnych,
- usytuowania materiałów palnych w stosunku do przegród budowlanych i rodzaj przegród budowlanych,
- reakcji chemicznych między zgromadzonymi materiałami w przypadku wzrostu temperatury,
- okres przechowywania materiałów (zmiana właściwości fizykochemicznych ze względu na starzenie się materiałów),
- możliwość dopływu powietrza (tlenu) do podtrzymania procesu spalania,
- rodzaju obiektu, pomieszczenia i jego wyposażenia technicznego itp.

W literaturze przedmiotu prawdopodobna moc pożaru jest określana w oparciu o analizy statystyczne pożarów dla konkretnych rodzajów obiektów budowlanych. Opracowania [38], [39] dzielą pożary na dwa podstawowe rodzaje. Pierwszy rodzaj to pożary o stałej mocy, które mogą rozwijać się tylko do określonej wartości mocy.

W przypadku, gdy w pomieszczeniu umieszczona pewna masa materiałów palnych do wyliczenia czasu trwania pożaru o stałej mocy może zostać wykorzystane poniższe równanie wg [39].

$$\Delta \tau = \frac{M_{\rm C} \cdot H_{\rm C}}{Q_{\rm C}} \tag{4.1}$$

gdzie:

 $\Delta t$  – czas trwania pożaru [s]  $M_C$ – całkowita masa zużytego materiału palnego [kg]  $H_C$ – ciepło spalania materiału palnego [kJ/kg]  $Q_C$ – całkowita moc pożaru [kW]

Drugi rodzaj to pożary rozwijające się o mocy zmieniającej się w czasie, które zawierają fazę wzrostu, fazę stałej mocy oraz fazę gaśnięcia. Moc wydzielanego podczas pożaru ciepła może zostać obliczona w oparciu o poniższy wzór zgodny z [39].

$$Q_{\rm C} = 1055 \cdot \left(\frac{\tau}{\tau_{\rm g}}\right)^2 \tag{4.2}$$

gdzie:

Q<sub>C</sub>- całkowita moc pożaru [kW]

 $\tau$  – czas liczony od momentu efektywnego zapalenia, następujący po okresie inkubacji [s]

 $\tau_g$ – charakterystyczny czas szybkości rozwoju pożaru tj. czas od momentu efektywnego zapalenia do osiągniecia pożaru o mocy 1055kW

Norma [40] w odróżnieniu od wspominanych powyżej zależności określa całkowitą moc pożaru zgodnie z poniższym wzorem:

$$Q_{\rm C} = \alpha \cdot \tau^2 \tag{4.3}$$

gdzie:  $Q_{c}$ - całkowita moc pożaru [kW]  $\alpha$  – współczynnik szybkości rozwoju pożaru [kW/s<sup>2</sup>]  $\tau$ - czas [s]

Ustalone teoretycznie i zweryfikowane doświadczalnie wartości współczynników szybkości rozwoju pożaru  $\alpha$  można znaleźć w opracowaniach [38], [39] oraz literaturze [41]. Na poniższym rysunku (rys. 4.1.) pokazano wykresy szybkości wydzielania ciepła w pożarach rozwijających się uzyskane na podstawie równania (4.3) i danych zawartych w [38].



Rys. 4.1. Wykres szybkości wydzielania ciepła w pożarach rozwijających się na podstawie [38]

Konwekcyjną część całkowitej mocy pożaru można określić za pomocą poniższego równania [40].

 $Q_{CONV}$ – część konwekcyjna całkowitej mocy pożaru [kW]  $Q_{C}$ – całkowita moc pożaru [kW]  $\chi$  – współczynnik konwekcji [-]

 $Q_{CONV} = (1 - \chi) \cdot Q_C$ 

Wartość współczynnika konwekcji może zostać ustalona w oparciu o wytyczne zawarte w normach [37], [38], [39] oraz [40] dane literaturowe. Zgodnie z ustaleniami zawartymi w opracowaniu [40] wartość współczynnika konwekcji  $\chi$  przyjmowana w obliczeniach powinna wynosić 0,333, natomiast opracowania [37], [38], [39] wymagają przyjmowania wartości na poziomie 0,3. Niemieckie opracowanie [42] wartość współczynnika konwekcji określa na poziomie 0,2.

Badania teoretyczne oraz badania w skali rzeczywistej pozwoliły usystematyzować i określić teoretyczne wartości strumieni masy dymu w zależności od rodzaju kolumny konwekcyjnej [38]. W przypadku występowania osiowo-symetrycznej kolumny konwekcyjnej strumień masy dymu można obliczyć z poniższych zależności [39].

$$m = (0,071 \cdot Q_{CONV}^{1/3} \cdot z^{5/3}) + 0,0018 \cdot Q_{CONV} \quad jeśli \ z > z_l$$
(4.5)

$$m = 0,032 \cdot Q_{\text{CONV}}^{1/3} \cdot z$$
 jeśli  $z \le z_1$  (4.6)

gdzie:

m – strumień masowy dymu w kolumnie konwekcyjnej na wysokości z [kg/s] Q<sub>CONV</sub>– część konwekcyjna całkowitej mocy pożaru [kW]

z – odległość miedzy podstawa pożaru a płaszczyzna graniczna warstwy dymu [m]

 $z_l$  – wysokość graniczna obliczona z zależności (4.7) w [m]

(4.4)

$$z_{\rm I} = 0,166 \cdot Q_{\rm CONV}^{2/5} \tag{4.7}$$

Standard projektowy [40] oraz dane literaturowe [41] określają strumień masy dymu według innych zależności.

gdzie:

m – strumień masowy dymu w kolumnie konwekcyjnej na wysokości z [kg/s] Q<sub>CONV</sub>– część konwekcyjna całkowitej mocy pożaru [kW] z – odległość miedzy podstawa pożaru a płaszczyzna graniczna warstwy dymu [m]

Opracowania [38], [39], [43] a także pozycje literaturowe np. [20], [41], [44] wyróżniają kolumny konwekcyjne asymetryczne, kolumny balkonowe rozlane (np. przepływ dymu pod balkonem do pomieszczenia o większej kubaturze), konwekcyjne kolumny okienne, kolumny ograniczone ekranami kierunkowymi a także kolumny stykające się ze ścianami itp.

Określanie właściwego rodzaju kolumny konwekcyjnej w danym przypadku warunkuje poprawność określania strumienia masy dymu ostatecznie wpływającego do warstwy podsufitowej. Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na fakt, że im większe jest pole powierzchni kontaktu gorących dymów i gazów pożarowych z otaczającym powietrzem tym bardziej wzrasta objętość dymów. Ilość porywanego powietrza na skutek przepływu gorących dymów i gazów pożarowych zależy od wielu czynników, z których najważniejsze to [45], [46]:

- 1. wartość temperatury i strumienia masowego gorących dymów i gazów pożarowych wpływających do kolumny konwekcyjnej,
- 2. rzeczywista długość ścieżki przepływu dymów w płaszczyźnie poziomej,
- 3. rzeczywista długość ścieżki przepływu dymów w płaszczyźnie pionowej (wysokość kolumny konwekcyjnej),
- 4. oddziaływanie czynników zewnętrznych i wewnętrznych (np. rzeczywista wysokość płaszczyzny neutralnej (NPP)).

Jak już wspomniano powyżej, wybrana spośród kilku opisanych w normach lub literaturze modeli kolumn konwekcyjnych gorących dymów i gazów pożarowych umożliwia określanie strumienia masy dymów wpływając do warstwy podsufitowej. Teoria większości modeli zakłada (np. [39]), że całość strumienia dymu z kolumny konwekcyjnej przepływa do warstwy podsufitowej. Energia wpływających gazów pożarowych kolumny konwekcyjnej do warstwy podsufitowej jest zmniejszana z uwagi na fakt wyrównania temperatur. W konsekwencji szybkość wznoszenia się dymów kolumny konwekcyjnej obniża się. W miarę rozwoju pożaru temperatura podsufitowej warstwy dymów wzrasta.

Gazy pożarowe kolumny konwekcyjnej, po wpłynięciu do podsufitowej warstwy dymów i częściowym wtraceniu energii, unoszą się dalej, aż do momentu napotkania przeszkody w postaci elementów konstrukcyjnych budynku (np. strop lub sufit pomieszczenia). Elementy konstrukcyjne budynku powodują, że gorące dymy i gazy pożarowe kolumny konwekcyjnej ponowienie wytracają część swojej energii. W przypadku płaskiego stropu gazy pożarowe po napotkaniu przeszkody tworzą gorący, burzliwy strumień sufitowy (ang. ceiling jet), który rozpływa się promieniowo równocześnie wymieniając ciepło z zimnymi przegrodami budowlanymi. Uogólniając zachodzące procesy można stwierdzić, że elementy konstrukcyjne budynku są ogrzewane na drodze przewodzenia, natomiast strumień sufitowy gorących gazów pożarowych jest chłodzony konwekcyjnie. Szybkość i efektywność wymiany ciepła zachodząca w powyżej opisanym procesie zależy przede wszystkim od temperatury elementów budynku oraz odległości od punktu kontaktu gorących gazów pożarowych kolumny konwekcyjnej z elementami konstrukcyjnymi budynku. Oba parametry zmieniają swoje wartości w zależności od szybkości rozwoju pożaru.

Zapewnienie bezpiecznych warunków ewakuacji, a tym samym możliwości prawidłowej praca każdego rodzaju systemu wentylacji oddymiającej wymaga prawidłowego umieszczenia, najlepiej w dolnej części pomieszczenia otworów lub nawiewów powietrza zewnętrznego. Ilość oraz prędkość dopływającego zewnętrznego powietrza kompensacyjnego powinna być na tyle duża, aby pozwalała na utrzymanie w dolnej części pomieszczenia stabilnych warunków ewakuacji.

Jednym z podstawowych modeli, o których wspomniano wcześniej jest model dwustrefowy. Zakłada on, że warstwa dolna pomieszczenia odpowiada warunkom zewnętrznym. Natomiast właściwości i wysokość podsufitowej warstwy gorących dymów i gazów pożarowych ulegają zmianom, ale w dowolnym momencie czasu charakteryzują się jednorodnością [38], [39] i [41]. W oparciu o prawa zachowania energii, prawo zachowania masy oraz prawo stanu gazu doskonałego - było możliwe uzyskanie równań, które szacują szybkość przepływu netto strumienia masowego gorących dymów z kolumny konwekcyjnej do warstwy podsufitowej oraz szybkość netto przyrostu entalpii z uwzględnieniem wymiany ciepła. Dodatkowo było możliwe ilościowe określenie zjawisk decydujących o wartości przepływów oraz wymianie ciepła.

Wypływ dymu na zewnątrz pomieszczenia przez otwory w stropie pomieszczenia zależy przede wszystkim od wartości różnicy ciśnienia hydrostatycznego po obu stronach otworów. W przypadku wymiarowania systemów wentylacji oddymiającej niektóre opracowania [42] wymagają uwzględniania przedmiotowej ustalonej wartości ciśnienia na pracę wentylatorów oddymiających.

Każdy system wentylacji oddymiającej jest skuteczny, jeżeli gwarantuje osiągniecie celów, którym ma służyć. Podstawowe cele projektowe to utrzymywanie przez określony czas minimalnej dopuszczalnej warstwy wolnej od dymu lub/i utrzymywanie maksymalnej dopuszczalnej temperatury warstwy podsufitowej dymu.

Wydajność mechanicznego systemu wentylacji oddymiającej może zostać ustalona na podstawie zależności podanej w opracowaniu [20].

$$V_1 = \frac{M_1 \cdot T_1}{\rho_{amb} \cdot T_{amb}}$$
(4.9)

gdzie:

 $V_l$  – minimalna wydajność systemu wentylacji oddymiającej zapobiegająca opadaniu podsufitowej warstwy dymu  $[m^3/s]$ 

M<sub>1</sub> – strumień masowy dymów i gorących gazów pożarowych wpływających do warstwy podsufitowej dymu [kg/s]

T<sub>1</sub> – średnia temperatura gazów w podstropowej warstwie dymu [K]

 $\rho$  - gęstość powietrza przy temperaturze otoczenia [kg/m<sup>3</sup>]

T<sub>amb</sub> – średnia temperatura otoczenia [K]

Opracowanie [38] podaje, że wydajność mechanicznego systemu wentylacji oddymiającej nie może być mniejsza niż masowe natężenie przepływu dymów w kolumnie konwekcyjnej, chyba że zostanie wykazane, iż szybkość usuwania dymów przez system uniemożliwia opadanie dymu poniżej ustalonego poziomu lub/i temperatura warstwy nie wzrośnie powyżej dopuszczalnego poziomu w zadanym czasie.

W opracowaniach [37], [40], [42] wartość minimalnego strumienia objętości systemu wentylacji oddymiającej może być ustalana z uwzględnianiem wpływu średniej obliczeniowej temperatury przegród budowlanych otaczających warstwę podsufitową dymu oraz średniej obliczeniowej temperatury dymów i gazów pożarowych.

Bardzo istotnym aspektem, na który należy zwrócić uwagę jest określenie maksymalnego dopuszczalnego strumienia objętości usuwanych gazów i dymów pożarowych przez jeden otwór wywiewny oraz minimalna ilość otworów wywiewnym. Przekroczenie maksymalnego dopuszczalnego strumienia objętości usuwanych gazów i dymów pożarowych przez jeden otwór lub zbyt mała ilość otworów wywiewnych może powodować niewłaściwą pracę systemu objawiającą się porywaniem czystego powietrza spod warstwy podsufitowej (ang. plugholing) [38], [41], [42].

Powyżej został przedstawiony, w ogólnym zarysie aktualny stan techniki dotyczący wymiarowania systemów wentylacji oddymiającej bez uwzględnienia wpływu stałych urządzeń gaśniczych, takich jak instalacja tryskaczowa lub instalacja mgły wodnej. Aktualnie standardy projektowe zwracają uwagę na problem współdziałania systemów kontroli rozprzestrzeniania dymów i ciepła oraz stałych wodnych urządzeń gaśniczych, tym instalacji tryskaczowych i mgłowych. Większość dostępnych opracowań nie określa w sposób jednoznaczny metod obliczeniowych wpływu chłodzącego działania uruchomionych tryskaczy na wymaganą wydajności instalacji wentylacji oddymiającej zarówno z uwzględnieniem aspektu średniej temperatury dymów w warstwie podsufitowej, jak i problemu utrzymywania poziomu warstwy podsufitowej.

W opracowaniu [20] można znaleźć informacje, że w przypadku współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej z instalacją tryskaczową należy obniżyć wartość część konwekcyjnej całkowitej mocy pożaru bez uwzględniania zmiany strumienia masy gazów pożarowych. Natomiast ostateczną średnią temperaturę dymów w warstwie podstropowej można ustalić jako średnią wartość miedzy wartością temperatury zadziałania tryskaczy a temperatura dymu bez działających tryskaczy. W [20] zostały podane wartości współczynników szybkości wydzielania ciepła na jednostkę powierzchni z uwzględnieniem rodzaju zainstalowanej instalacji tryskaczowej.

Znacznie dokładniejszą metodologię postępowania opisano w standardzie [37]. Dokument określa metodę analitycznego ustalenia czasów oraz teoretycznego wpływu działającej stałej wodnej instalacji gaśniczej na obniżanie moc pożaru w budynku. Opracowanie podaje niezbędne zależności analityczne, tabele (np. zależności czasu aktywacji tryskacza od wartości współczynnik szybkości rozwoju pożaru, wysokości instalacji tryskacza i wartości wskaźnik czasu zadziałania tryskacza) i metodologię postępowania.

Obecnie w bardzo wielu budynkach nowych lub budynkach rewitalizowanych znajdują zastosowanie systemy mgły wodnej, jako systemy równoważne w stosunku do standardowych instalacji tryskaczowych. Zasadnicza różnica między wodną instalacją tryskaczową a instalacją mgły wodnej dotyczy sposobu dystrybucji kropel wody oraz sposobu działania. Na poniższym rysunku (rys. 4.2.) przedstawiono w sposób poglądowy podstawową różnicę pomiędzy efektem działania zadziałania elementów instalacji tryskaczowej a instalacją mgły wodnej.



**Rys. 4.2.** Poglądowy rysunek przedstawiający podstawową różnicę pomiędzy instalacją tryskaczową a instalacją mgły wodnej

Mgła wodna jest to woda rozproszona na bardzo drobne krople. Podstawowym parametrem jest średnica charakterystyczna kropli wody oznaczana jako  $Dv_f$ . Za mgłę wodną uważa się tak rozpyloną wodę, że wartość charakterystycznej kropli  $Dv_{0,90} < 1000 \mu m$  [5]. Oznacza to, że 90% objętości rozpylonej wody będą stanowiły krople wody o średnicy od 0 do 1000  $\mu m$ . Na poniższym rysunku (rys. 4.3.) przedstawiono poglądowy widok pomieszczenia z uruchomioną instalacją mgły wodnej.



**Rys. 4.3.** Poglądowy widok pomieszczenia z uruchomioną instalacją mgły wodnej (źródło: VTT Technical Research Centre of Finland)

Uogólniając można stwierdzić, że systemy tryskaczowe i zraszaczowe po zadziałaniu mają za zadanie przede wszystkim zwilżanie powierzchni materiałów palnych, natomiast zasada działania systemy mgły wodnej opiera się na zwilżaniu powierzchni materiałów palnych, chłodzeniu dymów i gazów pożarowych oraz wypieraniu tlenu ze strefy spalania.

W zależności od planowanego sposobu zastosowania instalacji mgły wodnej w danym obiekcie i uwarunkowań lokalnych (np. gabaryty i geometria pomieszczeń, rodzaj i ilość materiałów palnych, warunki wentylacyjne itp.) musi ona charakteryzować się określonymi cechami takim jak: intensywność wypływu wody, szybkość wypływu wody, zasięg strumienia wody, kąt rozpylania, intensywność zraszania, powierzchnia zraszania, jednorodność zraszania, widmo rozpylania, przewodnictwo elektryczne itp.

Obecnie instalacje mgły wodnej w obiektach budowlanych stosowane są przede wszystkim jako instalacje zabezpieczające przed powstaniem pożaru, kontrolujące rozwój pożaru, zabezpieczające przegrody budowlane oraz instalacje technologiczne przed skutkami pożaru itp. W tym miejscu należy zaznaczyć, że głównym celem projektowym w przypadku zdecydowanej większość wodnych stałych urządzeń gaśniczych (instalacje tryskaczowe, zraszaczowe i mgłowe) instalowanych w obiektach budowlanych jest zapobieganie i kontrolowanie rozwoju pożaru przez założony czas, a nie jego ugaszenie.

Mgła wodna oraz zmieszanie z nią ewentualne dodatkowe środki chemiczne (tj. glikole obniżające temperaturę zamarzania, chlorki i sole poprawiające skuteczność gaśniczą oraz środki zmniejszające napięcie powierzchniowe) dzięki naturalnym właściwością wody jest bardzo dobrym środkiem gaśniczym. Woda cechuje się dużą wartością ciepła właściwego (4,180 kJ/(kgK)), ciepła parowania (2240kJ/kg przy temperaturze około 106°C, ciśnieniu 1,2bara) i przemianie fazowej w parę powodującej zwiększenie objętości około 1620-krotnie [47]. Zatem dostarczenie rozpylonej mgły wodnej bezpośrednio w strefę rozwoju pożaru przyczynia się do chłodzenia strefy spalania, ponieważ znaczne ilości energii muszą zostać zużyte na podniesienie temperatury kropel wody, a następnie ich odparowanie. Intensywne odparowanie, wyparcie tlenu ze strefy spalania oraz zwilżanie materiałów palnych znacząco przyczynia się do ograniczenia szybkości rozwoju pożaru. Uogólniając można stwierdzić, że zjawiska występujące podczas reakcji kropel mgły wodnej oraz środowiska pożaru to:

- 1. chłodzenie strefy spalania oraz dymów i gazów pożarowych,
- 2. chłodzenia materiałów palnych,
- 3. chłodzenia innych materiałów,
- 4. wypieranie tlenu ze strefy spalania i najbliższego otoczenia strefy spalania,
- 5. zmniejszenia ilości energii przekazywanej na drodze promieniowania do materiałów palnych,
- 6. samoistne porywanie kropel mgły wodnej z powietrzem do strefy spalania i strefy dymów pożarowych,
- 7. zjawisko "zamknięcia" przestrzenni spalania (ang. enclosure effect).

W literaturze przedmiotu [47] podaje się, że rozpylanie mgły wodnej może spowodować ograniczenie ilości cząstek stałych w dymach i gazach pożarowych oraz może zaabsorbować część rozpuszczalnych w wodzie gazów zmniejszając dzięki temu agresywność produktów spalania. Dodatkowo, warto w tym miejscu wspomnieć o fakcie, że w porównaniu z instalacjami tryskaczowymi straty popożarowe spowodowane zadziałaniem instalacji mgły wodnej są nieporównywalnie mniejsze.

Autorzy opracowań [47], [48] podają, że skuteczność ograniczania rozwoju pożaru w zamkniętych pomieszczeniach przez instalację mgły wodnej w zależy przede wszystkim od stopnia rozpylania, czyli wielkości kropel wody. Argumentami przemawiającymi za powyższym stwierdzeniem są:

- 1. izolowanie promieniowania cieplnego środowiska pożaru jest tym efektywniejsze im większa powierzchnia wody absorbuje to promieniowanie,
- 2. mniejsze średnice kropel wody pozwalają mi dłużej przebywać w stanie zawieszenia w powietrzu,
- 3. duży stopień rozpylenia wody powoduje, że mgła wodna jest znacznie mobilniejsza i umożliwia łatwiejsze dotarcie do przestrzeni trudnodostępnych. Większy stopień rozpylenia wody powoduje, że właściwości mgły wodnej stają się zbliżone do gazów, przez co omijają przeszkody bez wykraplania na nich.
- 4. małe krople wody sprzyjają efektywniejszemu chłodzeniu strefy spalania pożaru oraz strefy dymów i gazów pożarowych,
- 5. im mniejsze są średnice kropel wody tym łatwiej jest osiągnąć równomierność zraszania danej powierzchni.

Dostępne standardy projektowania nie podają sposobów analitycznego wyznaczania parametrów technicznych do zwymiarowania instalacji wentylacji oddymiającej z uwzględnieniem działającej instalacji mgły wodnej. W opracowaniu [49] wspomniano, że współdziałanie obu instalacji jest możliwe pod pewnymi warunkami, bez wskazywania dokładnych zależności.

Podstawowe prawa dla przepływu dwufazowego typu powietrze-woda z jakim mamy do czynienia w przypadku współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej nie zostały dotychczas ostatecznie wyjaśnione. Półempiryczne związki i modele matematyczne nie odzwierciedlają w pełni rzeczywistych uwarunkowań. Przepływ dwufazowy charakteryzuje się zmienną w czasie i przestrzeni granica miedzy fazową oraz wzajemnym oddziaływaniem faz. Przedmiotowe zjawiska utrudniają analityczny opis przepływów wymiany masy i ciepła. Zagadnienie staje się jeszcze bardziej skomplikowane jeśli uwzględni się fakt, że oba płyny ulegają dodatkowym przemianom fazowym, o których wspomniano powyżej. Opis matematyczny przepływów dwufazowych powoduje konieczność uwzględnienia dużej ilości zmiennych. W przypadku najprostszych przepływów dwufazowych należy wziąć pod uwagę następujące zmienne: strumień masowy gazu, strumień masowy cieczy, gestość gazu, gestość cieczy, lepkość dynamiczna gazu, lepkość dynamiczna cieczy, napięcie powierzchniowe, wymiary pomieszczenia, chropowatości powierzchni, przyspieszenie ziemskie itp. W celu uproszczenia zależności przepływów dwufazowych związki półempiryczne umożliwiają ustalenie, które liczby charakterystyczne (tj. liczba Revnoldsa, Liczba Frouda, Liczba Webera, stosunek gestości, udział masowy itp.) mają decydujący wpływ na zachowanie się danej mieszaniny w danych warunkach przepływu. Niestety otrzymane proste zależności, wymagają dokładnego ustalenia zakresów ważności, ponieważ zazwyczaj są prawdziwe dla ograniczonych zakresów.

Ustalenie matematycznych zależności, nawet półempirycznych dla przepływów dwufazowych i wielofazowych występujących przy współdziałaniu instalacji wentylacji oddymiającej i mgły wodnej jest niezwykle trudne. Wynika to z wielu uwarunkowań, do których można zaliczyć: uwarunkowania środowiskowe, materiałowe, geometryczne, fizykochemiczne, wentylacyjne w tym temperaturowe itp. Dodatkowo należy zauważyć, ze każde urządzenie do wytwarzania mgły wodnej charakteryzuje się indywidualnymi i niepowtarzalnymi cechami, których replikacja w innym urządzeniu nastręcza wiele problemów.

Z wyżej wymienionych powodów dostępne zależności matematyczne opierają się przede wszystkim na analizach i wnioskach z badań w rzeczywistej skali geometrycznej oraz wynikach badań numerycznych (symulacje CFD).

# 4.2. Badania w rzeczywistej i zmniejszonej skali geometrycznej

Większość dostępnych raportów z badań i testów pożarowych dotyczy prób ustalenia wzajemnych interakcji pomiędzy działającą instalacją wentylacji oddymiającej (najczęściej grawitacyjną) i instalacją tryskaczową. Wnioski płynące z przedmiotowych analiz otrzymanych wyników badań pozwalają również na zrozumienie problemów związanych ze współdziałaniem instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej.

Już we wczesnych latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku zostały przeprowadzone pierwsze badania w średniej skali geometrycznej (Heskestad, 1974) oraz w skali rzeczywistej (Miller, 1980), które umożliwiły ustalenie następujących wniosków [38]:

- 1. instalacja wentylacji oddymiającej prowadzi do szybszego zużycia materiałów palnych, ale opóźnia utratę widoczności w warunkach pożarowych,
- 2. w zależności od lokalizacji źródła pożaru w stosunku do otworów wyciągowych ilość zużytej wody do ugaszenia pożaru przez instalacje tryskaczową została zwiększona lub zmniejszona w odniesieniu do sytuacji bez działającej instalacji wentylacji oddymiającej. W przypadku lokalizacji pożaru bezpośrednio lub w niedalekiej odległości od otworu wyciągowego zapotrzebowanie wody na ugaszenie pożaru zmniejszyło się. W innym przypadku, kiedy lokalizacja źródła pożaru znajdowała się w takiej samej odległości od dwóch sąsiednich otworów wywiewnych wówczas zapotrzebowanie wody do ugaszenia pożaru ulegało zwiększeniu.

W roku 1994 w ośrodku badawczym Factory Mutual Research (FM Global USA) zostały przeprowadzone badania w skali rzeczywistej, które wykazały, że przy pewnych rozwiązaniach technicznych kurtyn dymowych mogą one mieć niekorzystny wpływ na skuteczność gaszenia pożaru przez instalację tryskaczową. Analiza otrzymanych wyników badań pokazała, że w zbiornikach dymu utworzonych przez kurtyny dymowe w pewnych strefach uruchamia się zbyt duża ilość tryskaczy, których aktywacja powoduje znaczne szkody materialne.

Również w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku Hinkley [50] po przeprowadzeniu badań w skali rzeczywistej doszedł do następujących wniosków:

- 1. wcześniejsze otwarcie otworów wywiewnych dymu ma niewielki wpływ na czas uruchomienia pierwszego tryskacza,
- 2. działająca instalacja wentylacji oddymiającej przyczynia się do znacznego zmniejszenia ilości uruchamianych tryskaczy.

Niezależną analizę materiału badawczego Hinkley [50] w roku 1992 przeprowadził Gustafsson [51], który zauważył, że w bardzo wielu przypadkach tryskacze zlokalizowane w górnej części pomieszczenia w niedalekiej odległości od źródła pożaru nie aktywowały się w ogóle lub proces aktywacji następował z opóźnieniem.

W roku 1998 Fire Protection Research Foundation przeprowadziła badania w skali rzeczywistej wzajemnych interakcji instalacji tryskaczowej, działającej instalacji oddymiającej składającej się z kurtyn dymowych oraz klap dymowych. Najważniejsze wnioski płynące z przeprowadzonej analizy wyników badań to [38]:

- 1. w przypadku lokalizacji źródła pożaru bezpośrednio pod otworem wywiewnym liczba aktywowanych tryskaczy zmniejszała się,
- 2. odnotowano większe zużycie materiału palnego w przypadku lokalizacji źródła pożaru pod kurtyną dymową,
- 3. nie został określony jednoznacznie wpływ wzajemnych interakcji działającej instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji tryskaczowej na zasięg widoczności,
- 4. osiągnięto zadawalające rezultaty gaszenia pożaru przez instalacje tryskaczowa w przypadku lokalizacji źródła pożaru bezpośrednio pod otworem wyciągowym.

W opracowaniu [52], w oparciu o wyniki najnowszych badań i testów pożarowych zwraca się uwagę na fakt, że średnia temperatura warstwy dymu utrzymywana przez instalację wentylacji oddymiającej w zbiorniku dymu oraz/lub średnia temperatura strumienia sufitowego (poza tryskaczami działającymi w trybie gaszenia) nie może być znacząco wyższa niż temperatura aktywacji pozostałych tryskaczy ze względu na ich chłodzący wpływ na podstropową warstwę dymu. Zatem po uruchomieniu pierwszego tryskacza w pobliżu źródła pożaru należy uwzględnić jego wpływ na średnią temperaturę podstropowej warstwy dymu. Dodatkowo w [52] zaznaczono, że wymiarowanie instalacji wentylacji oddymiającej powinno uwzględniać efekt obniżenia warstwy podstropowej dymu na skutek zadziałania tryskaczy.

Dotychczasowe badania i eksperymenty obejmujące wzajemne interakcje pomiędzy instalacjami oddymiającymi a stałymi urządzeniami gaśniczymi nie wykazały jednoznacznie, że działanie instalacji wentylacji oddymiającej ma negatywny wpływ na gaszenie pożarów przez instalacje tryskaczowe. Wykazano natomiast, że przy nie uwzględnieniu uwarunkowań lokalnych (np. prawidłowego ustalenia kształtu stref dymowych ze względu na możliwą lokalizację źródła pożaru, konstrukcji kurtyn dymowych, odległości miedzy otworami wyciągowymi itp.) współdziałanie obu instalacji może zostać poważnie zakłócone.

Dostępne opracowania, literatura oraz artykuły przedstawiające wyniki analiz efektów badań i eksperymentów w przeważającej większości dotyczą zastosowania mgły wodnej do kontrolowania rozwoju pożaru w tunelach komunikacyjnych. Omówienia wyników eksperymentów w tym zakresie można znaleźć w opracowaniach [53], [54], [55]. Autorzy przedmiotowych prac podają, że uruchomienie instalacji mgły wodnej w większości przeprowadzonych testów ograniczyło rozwój pożarów. W pracy [56] oraz [57] autorzy przedstawili wyniki testów i obliczeń trajektorii kropel mgły wodnej w zależności od warunków wentylacyjnych w tunelach komunikacyjnych. Rysunek 4.4. przedstawia poglądowy wykres osiągniętych odległości przez krople wody (0,12mm) w zależności od prędkości przepływającego powietrza.



**Rys. 4.4**. Poglądowy wykres osiągniętych odległości przez krople wody (0,12mm) w zależności od prędkości przepływającego powietrza [56]

Przykłady analiz wyników badań eksperymentalnych wpływu warunków stwarzanych przez działającą wentylację ogólną na kontrolowanie rozwoju pożaru przez mgłę wodną zostały zaprezentowane miedzy innymi w pracach [58] i [59]. W pracy [58] autor po przeprowadzeniu badań i eksperymentów stwierdził, że właściwości gaśnicze mgły wodnej w pomieszczeniach, w których gwałtownie zmieniają się warunki wentylacji (tj. otwarte drzwi pomieszczenia, otwarte drzwi pomieszczenia i działające wentylatory) ulegają pogorszeniu.

Z kolei w pracy [59] autorzy wstępnie przebadali wzajemne interakcje pomiędzy dymami i gazami pożarowymi oraz mgłą wodną. Poglądowy rysunek stanowiska badawczego przedstawiono poniżej (rys.4.5.).



Rys. 4.5. Widok stanowiska badawczego [59]

Analiza wyników uzyskanych pomiarów potwierdziła chłodzące właściwości mgły wodnej i jej oddziaływanie na dymy i gazy pożarowe oraz przegrody budowlane. Chłodzenie gorących dymów i gazów pożarowych przez mgłę wodną spowodowało obniżenie podsufitowej warstwy dymu i zanik widoczności w korytarzu.

### 4.3. Badania numeryczne

Dostępne wyniki badań numerycznych współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej oraz instalacji mgły wodnej dotyczą przede wszystkim zjawisk zachodzących w tunelach komunikacyjnych, czyli pożarów o dużych mocach (30 MW) oraz stosunkowo dużych prędkościach przepływu powietrza (10 m/s).

W opracowaniu [60] autor przedstawia analizę otrzymanych zwalidowanych wyników obliczeń numerycznych współdziałania instalacji mgły wodnej oraz zmodernizowanej wyporowej wentylacji ogólnej. Na rysunku 4.6. zostały przedstawione widoki zewnętrzne stanowiska badawczego w skali rzeczywistej, natomiast na rysunku 4.7. zaprezentowano widok wnętrza stanowiska badawczego opracowany w programie FDS (Fire Dynamics Simulator) i wykorzystany w obliczeniach numerycznych.



Rys. 4.6. Widoki zewnętrzne stanowiska badawczego w skali rzeczywistej [60]



Rys. 4.7. Widok wnętrza stanowiska badawczego w programie do obliczeń numerycznych (FDS) [60]

Zarówno obliczenia numeryczne, jaki i testy w skali rzeczywistej zostały przeprowadzone dla pożaru testowego w pomieszczeniu o długości 3,0m, szerokości 2,4m, wysokości 2,4m. Otrzymane wyniki obliczeń numerycznych (program FDS) oraz wyniki testów w skali rzeczywistej ujawniły jednakowe tendencje do obniżania temperatury dymów i gazów pożarowych w pomieszczeniu w wyniku współdziałania instalacji wentylacji i instalacji mgły wodnej. Porównanie wyników obliczeń numerycznych oraz wyników badań w skali rzeczywistej wykazało, że obliczenia numeryczne charakteryzują się znacznie szybszym tempem przyrostu temperatury niż ma to miejsce w rzeczywistości. Kolejnym ważnym spostrzeżeniem było zauważenie przez autora, że w rzeczywistości następowało znacznie lepsze wymieszanie powietrza wentylacyjnego i mgły wodnej niż wynikałoby to z obliczeń numerycznych. To spowodowało występowanie różnic temperatur między wartościami obliczeniowymi a pomierzonymi.

Autor sugeruje, że konieczne są kolejne badania umożliwiające szczegółową analizę zjawisk, optymalizację zużycie wody oraz wielkość kropel. Zwraca uwagę, że obliczenia numeryczne mogą służyć do wstępnego doboru urządzeń, natomiast prawidłowości doboru parametrów technicznych urządzeń każdorazowo powinna zostać potwierdzona testami w skali rzeczywistej.

Pomimo znacznej ilości opracowań teoretycznych, badań eksperymentalnych, obliczeń numerycznych oraz analiz wyników dotyczących zastosowania mgły wodnej i instalacji oddymiającej w budynkach aktualnie brak w dostępnej literaturze konkretnych informacji i danych opisujących efektywności i zasady współdziałania obu instalacji.

Gwałtowne ograniczenie widoczności oraz wzrost temperatury są największymi przeszkodami uniemożliwiającymi bezpieczną ewakuację ludzi z budynków oraz prowadzenie działań ratowniczo-gaśniczych. Przedmiotowe zagadnienie jest szczególnie ważne i istotne w budynkach użyteczności publicznej. Uwzględniając szybki rozwój techniczny, oryginalne wizje architektoniczno-budowlane konieczne są dalsze badania teoretyczne i eksperymentalne dotyczące identyfikacji zagrożeń pożarowych, ulepszania istniejących systemów oraz rozwijania nowych rozwiązań technicznych w zakresie środków zabezpieczenia przeciwpożarowego w budynkach.

# 5. BADANIA EKSPERYMENTALNE NA STANOWISKU BADAWCZYM

# 5.1. Cel i program badań

Głównym celem niniejszej pracy jest ocena efektywności współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej z instalacją mgły wodnej w budynkach w aspekcie poprawy warunków ewakuacji, ograniczenia szkód w wyposażeniu budynków wywołanych pożarem oraz optymalizacji kosztów wykonania wymienionych instalacji.

W zdecydowanej większości przypadków podstawowym zadaniem mechanicznej instalacja wentylacji oddymiającej w czasie pożaru jest utrzymanie warstwy gorących gazów pożarowych tak, aby unosiły się ponad chłodniejszym, czystym powietrzem a tym samym zostały zapewnione warunki bezpiecznej ewakuacji ludzi z zagrożonej strefy. Przyjmuje się, że bezpieczne warunki ewakuacji zostają zachowane, jeżeli występuje na wysokości większej lub równej 1,8m nad poziomem posadzki zadymienie ograniczające widoczność krawędzi elementów budowlanych i drzwi powyżej 10m oraz temperatura powietrza nie wyższa niż 60°C [13]. Aktualnie osiągniecie tego celu jest realizowane przez intensywne usuwanie dymów i gazów pożarowych z górnej części pomieszczenia oraz zapewnienie stałego dopływu powietrza zewnętrznego uzupełniającego braki tego powietrza w wyniku jego wypływu wraz z dymem. Takie podejście powoduje, że ze względu na wymaganą temperaturę dymów i gazów pożarowych utrzymywanych nad drogami ewakuacyjnymi konieczne są znaczne wydajności urządzeń i gabaryty poszczególnych elementów instalacji wentylacji oddymiającej.

Alternatywnym rozwiązaniem tego problemu w wielu obiektach budowlanych może stanowić współdziałanie tradycyjnej instalacji wentylacji oddymiającej oraz instalacji mgły wodnej. Współdziałanie obu instalacji, ukierunkowanie przepływu nawilżonego powietrza zewnętrznego oraz uzyskaniu układ warstw powietrza zewnętrznego i dymów będzie powodowało, że dzięki mieszaninie stosunkowo niewielkiego strumienia masowego powietrza zewnętrznego i rozpylonej mgły wodnej w obrębie dróg ewakuacyjnych zostanie obniżona odczuwalna temperatura, moc promieniowania, a także lotność toksycznych produktów spalania. Na poniższym rysunku (rys. 5.1.) zostało przedstawione poglądowe porównanie zasad funkcjonowania obu rozwiązań.





W oparciu o badania wstępne, eksperymenty eksploatacyjne oraz analizę danych literaturowych zostały przyjęte następujące tezy badawcze:

- 1. zastosowanie współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej w pomieszczeniach objętych pożarem obniży temperaturę odczuwalną oraz temperaturę dymów i gazów pożarowych.
- 2. istnieje zależność między efektywnością redukcji temperatury w pomieszczeniu podczas pożaru, temperaturą usuwanych gazów pożarowych oraz ilorazem strumieni masowych powietrza i mgły wodnej.

W celu weryfikacji tez badawczych postawionych w niniejszej rozprawie został przyjęty plan badań, których schematy blokowe przedstawiono na poniższych rysunkach (rys. 5.2. oraz rys. 5.3.). Wszystkie eksperymenty zostały przeprowadzone w średniej skali. Wszystkie obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone w programie FDS (Fire Dynamics Simulator). Obiektem badań było współdziałanie instalacji wentylacji oddymiającej oraz instalacji mgły wodnej.



Rys. 5.2. Realizacja badań - podział na etapy

Pierwszy etap badań miał na celu przygotowanie autorskiej metodyki przeprowadzenia badań współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej z instalacją mgły wodnej w warunkach zbliżonych do warunków, w których przeprowadzono badanie wyłącznie instalacji wentylacji oddymiającej. Obliczenia analityczne zostały wykonane w oparciu o standardy projektowe [37] i [42]. Skalowanie stanowiska badawczego zostało przeprowadzone w oparciu o wytyczne zawarte w [38] i [61]. Projekt stanowiska badawczego został przygotowany w oparciu o normę [7], [8] oraz [39]. Po wykonaniu stanowiska badawczego przeprowadzono szereg testów i badań porównawczych efektywności obniżania temperatury przez instalację wentylacji oddymiającej oraz współdziałających instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej przy różnych wartościach mocy pożarów. Badania przeprowadzono w oparciu o główne założenia metodyki zawartej w [7], [8] oraz ustalenia autorskie. Pierwszy etap badań miał na celu wykazanie zależności między efektywnością redukcji temperatury w pomieszczeniu podczas pożaru, temperaturą usuwanych gazów pożarowych oraz ilorazem strumieni masowych powietrza i mgły wodnej. Przedmiotowe badania zostały przeprowadzone zgodnie z metodą autorską. Na obu etapach badań zostały wykonane pomiary następujących wielkości:

- 1. ciśnienie barometryczne,
- 2. temperatura powietrza zewnętrznego,
- 3. wilgotność względnej powietrza zewnętrznego,
- 4. prędkość powietrza zewnętrznego,
- 5. temperatura powietrza wewnętrznego,
- 6. wilgotność względnej powietrza wewnętrznego,
- 7. prędkość powietrza wewnętrznego,
- 8. strumień objętości powietrza kompensującego (nawiew),
- 9. strumień objętości usuwanych gazów pożarowych,
- 10. temperatura gazów pożarowych,
- 11. zawartość dwutlenku węgla w gazach pożarowych,
- 12. zawartość tlenku węgla w gazach pożarowych,
- 13. temperatura przegród budowlanych,
- 14. temperatura wody do wytworzenia mgły wodnej,
- 15. strumień objętości i ciśnienie wody do wytworzenia mgły wodnej.

Na podstawie pomierzonych i zarejestrowanych parametrów powietrza, wody lub gazów pożarowych pozostałe parametry uzyskano na drodze obliczeniowej.

Wykorzystując uzyskane pomiary na stanowisku badawczym określono efektywności redukcji temperatury podczas pożaru, temperatury usuwanych gazów pożarowych oraz iloraz strumienia masowego mgły wodnej i powietrza.

W następnej fazie badań zostały wyznaczone wykresy zależności między:

- 1. średnią temperaturą w przestrzeni badawczej przy przyjętej mocy pożaru a strumieniem objętości powietrza kompensującego,
- 2. średnią temperaturą w przestrzeni badawczej przy przyjętej mocy pożaru a strumieniem objętości usuwanych gazów pożarowych,
- 3. średnią temperaturą w przestrzeni badawczej przy przyjętej mocy pożaru a strumieniem objętości mgły wodnej,

Na podstawie powyższych danych dokonano wstępnej oceny efektywności redukcji temperatury podczas pożaru, temperatury usuwanych gazów pożarowych oraz ilorazu strumieni masowych mgły wodnej i powietrza.

Ocena efektywności współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej.....



Rys. 5.3. Realizacja badań. Schemat blokowy realizacji badań etapu drugiego

Każde badanie eksperymentalne zostało poprzedzone testami i badaniami wstępnymi, których celem było ustalenie minimalnej ilości pomiarów w jednym badaniu, czasu badania oraz określenie współczynników poprawkowych.

W każdym badaniu wykonano minimalnie pięć pomiarów, których wyniki zostały uśrednione. Badanie przeprowadzono przy porównywalnych warunkach zewnętrznych i wewnętrznych. Badania rozpoczęto od ustalenia bezpiecznej mocy generowanych pożarów, dla których zostaną przeprowadzone badania docelowe.

Badania pracującej instalacji wentylacji oddymiającej, a następnie współpracujących instalacji wentylacji oddymiającej oraz instalacji mgły wodnej przeprowadzono przy tych samych strumieniach objętości powietrza kompensującego oraz strumienia objętości usuwanych gazów pożarowych.

W oparciu o otrzymane wyniki pomiarów przy działającej i wyłączonej instalacji mgły wodnej określono efektywność redukcji temperatury.

### 5.2. Stanowisko badawcze

#### 5.2.1. Założenia, obliczenia i skalowanie stanowiska badawczego

Podstawowa wielkością umożliwiającą opracowanie założeń badawczych oraz założeń projektowych dla instalacji wentylacji oddymiającej na stanowisku badawczym było określenie bezpiecznej wielkość badanych pożarów odpowiadających mocom pożarów ustalonych w standardach projektowych. W oparciu o przewidywane wielkość badanych pożarów, a w szczególności parametry takie jak pole powierzchni pożaru, obwód pożaru, całkowity strumień wydzielanego ciepła itp. możliwe było analityczne ustalenie podstawowych parametrów stanowiska badawczego.

#### Założenia

W celu wykonania obliczeń analitycznych przyjęto następujące założenia:

- a) kształt i rzeczywiste wymiary pomieszczenia badawczego odpowiadają powiększonym wymiarom określonym w [7] i wynoszą odpowiednio: długość 16,8m, szerokość 8,4m, wysokość 8,4m,
- b) pole powierzchni pomieszczenia: 141,1m<sup>2</sup>,
- c) kubatura pomieszczenia: 1185,4 m<sup>3</sup>,
- d) rodzaj przegród budowlanych: betonowe,
- e) wariant 1: całkowita moc pożaru wg [42]: 1500 kW, część konwekcyjna 1200 kW,
- f) wariant 2: całkowita moc pożaru wg [42]: 6000 kW, część konwekcyjna 4800 kW,
- g) lokalizacja źródła pożaru na środku pomieszczenia badawczego,
- h) wysokość warstwy wolnej od dymu: 6,7m,
- i) maksymalna temperatura dymów i gazów pożarowych w przestrzeni podsufitowej: 200°C,
- j) obliczony strumień objętości usuwanych dymów i gazów pożarowych przez instalację oddymiająca jest równy strumieniowi objętości zewnętrznego powietrza kompensującego,
- k) temperatura powietrza zewnętrznego: 20°C.

# Obliczenia analityczne instalacji oddymiającej

Przykładowe wyniki obliczeń analitycznych związane z przebiegiem rozwoju pożaru zgodnie z metodyką zawartą w [40] przedstawiono na poniższym rysunku (rys. 5.4.).



Rys. 5.4. Przykładowy wykres rozwoju pożaru o mocy całkowitej 6000 kW [40]

Wyniki obliczeń analitycznych związane z określeniem niezbędnej wydajności instalacji wentylacji oddymiającej zostały zawarte w poniższej tablicy (tabl. 5.1.).

Całkowita obliczeniowa moc pożaru	Wartość	Jednostka	Opis parametru	
	85.000	[m <sup>3</sup> /h]	Obliczeniowy strumień objętości usuwanych dymów i gazów pożarowych zgodnie z [37] (VDI)	
	53	[°C]	Średnia obliczeniowa temperatura warstwy podsufitowej gorących dymów i gazów pożarowych zgodnie z [37] (VDI)	
1500 kW	73.000	[m <sup>3</sup> /h]	Obliczeniowy strumień objętości usuwanych dymów i gazów pożarowych zgodnie z [42] (DIN)	
	60	[°C]	Średnia obliczeniowa temperatura warstwy podsufitowej gorących dymów i gazów pożarowych zgodnie z [42] (DIN)	
6000 kW	188.000	[m <sup>3</sup> /h]	Obliczeniowy strumień objętości usuwanych dymów i gazów pożarowych zgodnie z [37] (VDI)	
	82	[°C]	Średnia obliczeniowa temperatura warstwy podsufitowej gorących dymów i gazów pożarowych zgodnie z [37] (VDI)	
	182.000	[m <sup>3</sup> /h]	Obliczeniowy strumień objętości usuwanych dymów i gazów pożarowych zgodnie z [42] (DIN)	
	90	[°C]	Średnia obliczeniowa temperatura warstwy podsufitowej gorących dymów i gazów pożarowych zgodnie z [42] (DIN)	

Tabl. 5.1. Porównanie wyników oblicz	eń analitycznych określających	wydajności instalacj	i oddymiającej
--------------------------------------	--------------------------------	----------------------	----------------

Wartości podane w powyższej tablicy (tabl. 5.1.) uwzględniają konieczność wielokrotnej i prawidłowej pracy dostępnych wentylatorów oddymiających na stanowisku badawczym.

#### Przykładowe obliczenia analityczne

Na podstawie zależności podanych w standardzie projektowym [42] (DIN) ustalono podstawowe parametry funkcjonowania instalacji wentylacji oddymiającej dla pożaru o mocy całkowitej 6000kW przy założeniu warstwy wolnej od dymu na wysokości 2,5m od poziomu posadzki:

- 1. obliczeniowy strumień objętości usuwanych dymów i gazów pożarowych 77.000 m<sup>3</sup>/h,
- 2. średnia obliczeniowa temperatura warstwy dymów i gazów pożarowych 290°C.

Teoretyczna ilość energii, która może zostać zaabsorbowana z dymów i gazów pożarowych o temperaturze około 290°C przez 1 kg rozpylonej mgły wodnej o temperaturze 18°C będzie wynosiła około  $E_{mw}\approx 2,97$ MJ.

 $E_{mw}=4,187 kJ/kg \cdot 1 kg \cdot (100^{\circ}C - 18^{\circ}C) + 2257 kJ/kg \cdot 1 kg + 1,930 kJ/kg \cdot 1 kg \cdot (290^{\circ}C - 100^{\circ}C) \approx 2,97 MJ$ 

Zatem szacunkowa ilość ciepła zaabsorbowana w jednostce czasu przez 1kg/s rozpylonej mgły wodnej będzie wynosiła 2970 kW. Przewidywana zredukowana średnia obliczeniowa temperatura warstwy dymów i gazów pożarowych uwzględniająca efektywność rozpylania wody (przyjęto około 60%) oraz ilość zaabsorbowanego ciepła przez rozpyloną mgłę wodną i powietrze będzie wynosiła około 100°C.

Dla porównania, teoretyczna ilość energii, która może zostać zaabsorbowana z dymów i gazów pożarowych o temperaturze około  $290^{\circ}$ C przez 1 kg nawiewanego powietrza kompensującego o temperaturze  $18^{\circ}$ C będzie wynosiła około  $E_{p}=0,27$ MJ.

 $E_p=1,006kJ/kg \cdot 1kg \cdot (290^{\circ}C-18^{\circ}C) \approx 0,27MJ$ 

Powyższa wartość E<sub>p</sub> jest około 11 razy mniejsza niż wartość E<sub>mw</sub> uzyskana dla mgły wodnej.

#### Skalowanie modelu badawczego

,

Skalowanie stanowiska badawczego zostało przeprowadzone w oparciu o wytyczne zawarte w standardzie projektowym [38], [39] oraz dane literaturowe [61]. Obliczenia skalowania charakterystycznych parametrów stanowiska badawczego przeprowadzono w oparciu równania zawarte w poniższej tabeli (tabl. 5.2.).

Liczby kryterialne	Opis równania
$x_m = x_F(l_m/l_F)$	Wymiary geometryczne
$T_m = T_F$	Temperatura
$Q_m = Q_F (l_m / l_F)^{5/2}$	Całkowita moc pożaru
$Q_{c,m} = Q_{c,F} (l_m / l_F)^{5/2}$	Konwekcyjna moc pożaru
$V_{fan,m} = V_{fan,F} (l_m/l_F)^{5/2}$	Strumień objętościowy usuwanych dymów i gazów pożarowych
$V_{MW,m} = V_{MW,F} (l_m/l_F)^{5/2}$	Strumień objętościowy mgły wodnej
$D_{MW,m} = D_{MW,F} (l_m/l_F)^{1/2}$	Średnica kropel mgły wodnej
$(k\rho c)_m = (k\rho c)_F (l_m/l_F)^{0.9}$	Właściwości przegród budowlanych
$t_m = t_F (l_m / l_F)^{1/2}$	Czas

Fabl. 5.2. Zestawienie podstawowych równań skalowania modelu badawc	zego
---	------

gdzie:

l-wymiar [m],

x – wymiar geometryczny w [m],

Q – moc pożaru [kW],

t – czas [s],

T – temperatura [K], [°C],

V – strumień objętości [m<sup>3</sup>/h], [dm<sup>3</sup>/min],

(kpc) – właściwości cieplne przegród budowlanych (tj. k-przewodność, p-gęstość, c-ciepło właściwe),

Indeksy: c - konwekcyjny, F - skala rzeczywista, m - skala zredukowana, fan - wentylator, MW - mgła wodna.

Przyjęto następujące ogólne założenia badawcze:

- 1. wykonanie modelu badawczego w skali 1:10 (tj. stosunek  $l_m/l_F=0,1$ ),
- 2. minimalny czas trwania pomiarów na stanowisku badawczym będzie wynosił około 240 sekund, co odpowiada upływowi czasu w warunkach rzeczywistych około 750 sekundom (12 minut i 30 sekund),
- 3. czas załączania instalacji wentylacji oddymiającej oraz instalacji mgły wodnej na stanowisku badawczym będzie wynosił około 20 sekund, co odpowiada upływowi czasu w warunkach rzeczywistych około 60 sekund (1 minuta).

#### 5.2.2. Budowa stanowiska badawczego

Wszystkie badania zostały przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych. Stanowisko do badań instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej oraz ich wzajemnego współdziałania zostało wykonane w oparciu o wyniki skalowania oraz główne założenia zawarte w normach [7] i [8].

Zasadnicze elementy głównej komory badawczej odpowiadają wymiarom zawartym w normie ISO/TS 17431:2006 Fire tests – Reduced-scale model box test [7]. Ta metoda testów pożarowych potocznie nosi nazwę metody MB (ang. reduced scale Model Box). Kubatura wewnętrzna komory badawczej wynosi 1,185 m<sup>3</sup>. Wymiary źródeł pożarów wywoływanych w głównej komorze badawczej zostały opracowane w oparciu o wyniki skalowania oraz informacje zawarte w normie AS 4391:1999 Smoke management systems – Hot smoke test [8] oraz własne badania próbne.

Mniejsza skala badawcza pozwala na dokładniejszą regulację parametrów mediów dostarczanych do komory badawczej oraz bezpieczną obserwację podstawowych zjawisk zachodzących podczas pożarów.

Na poniższych rysunkach (rys. 5.5. - 5.9.) oraz fotografiach (rys. 5.10. – 5.12.) zostały przedstawione schematy poglądowe stanowiska badawczego z zainstalowanymi układami pomiarowymi oraz widoki komór badawczych zawierające podstawowe wymiary. Natomiast na pozostałych rysunkach zostały zaprezentowane widoki stanowiska badawczego w hali laboratoryjnej.

Stanowisko badawcze składa się z kilku podstawowych zespołów:

- 1. komory badawcze (1) składają się:
  - komora nawiewna (1.1),
  - główna komora badawcza (1.2),
  - komora wywiewna (1.3);
- 2. zespół źródła pożaru (2) składający się z:
  - pojemnika z paliwem (2.1),
  - pojemnika zabezpieczającego z wodą (2.2);
- 3. zespół wentylatora nawiewnego (3) z regulacją wydajności,
- 4. zespół wentylatorów wywiewnych (4) z niezależną regulacją wydajności,
- 5. zespół wytwornicy dymu (5) z niezależną regulacją wydajności składający się z:
  - wytwornicy dymu (5.1),
  - zbiornika dymu (5.2);
- 6. zespół instalacji wytwarzającej mgłę wodną (6) składający się z:
  - zbiornik zasilający z wodą zdemineralizowaną (6.1),
  - pompa (6.2),
  - dysza mgły wodnej (6.3),
  - zawór regulacyjny (6.4),
  - zbiornik magazynujący (6.5),
  - manometr (6.6);

- 7. zespoły pomiarowe składające się z:
  - układu termopar T1, T2, T3, T4 (7.1) w głównej komorze badawczej (1.1),
  - układu pomiarowego analizatora spalin (7.2) w komorze wywiewnej (1.3),
  - anemometru oraz uniwersalnego przyrządu do pomiaru parametrów powietrza
  - pirometru,
  - kamery termowizyjnej;
- 8. zespoły rejestrujące pomiary składające się z kamer oraz aparatów cyfrowych.



Rys. 5.5. Schemat stanowiska badawczego (oznaczenia zawarto w tekście)

Ocena efektywności współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej.....



Rys. 5.6. Stanowisko badawcze - widok izometryczny (oznaczenia zawarto w tekście)


Rys. 5.7. Stanowisko badawcze - widok z przodu (oznaczenia zawarto w tekście)



Rys. 5.8. Stanowisko badawcze - widok z boku (oznaczenia zawarto w tekście)

Ocena efektywności współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej.....



Rys. 5.9. Stanowisko badawcze - widok z góry (oznaczenia zawarto w tekście)



Rys. 5.10. Widok stanowiska badawczego do wizualizacji przepływu dymów



Rys. 5.11. Widok stanowiska badawczego do wizualizacji przepływu dymów



Rys. 5.12. Widok stanowiska badawczego przygotowanego do badań

## 5.2.3. Zasady funkcjonowania stanowiska badawczego

W głównej komorze badawczej (1.2) został umieszczony pojemniki (2.1) lub pojemniki z paliwem o zawartość alkoholu etylowego. Pole powierzchni pojemnika (2.1) lub pojemników zostało tak dobrane, aby uzyskać pożądane moce pożarów. Ze względów bezpieczeństwa pojemniki (2.1.) muszą znajdować się w tacy zabezpieczającej (2.2), która jest wypełniona wodą. Zespół wentylatora nawiewnego (3) oraz zespół wentylatorów wywiewnych (4) stanowią układ instalacji wentylacji oddymiającej głównej komory badawczej (1.2).

Do komory nawiewnej (1.1) zespół wentylatora nawiewnego (3) umożliwia dostarczenie wymaganej ilości zewnętrznego powietrza kompensującego, które następnie jest nawiewane do głównej komory badawczej (1.2). Wywiew gazów spalinowych z głównej komory badawczej (1.2) odbywa się przez dwa otwory wywiewne o regulowanym polu powierzchni zlokalizowane w stropie komory. Następnie gazy pożarowe usuwane są do komory wywiewnej (1.3) skąd odciągane są przez zespół wentylatorów wywiewnych (4) na zewnątrz stanowiska badawczego.

Każdy wentylator wyposażony jest w niezależny układ regulacji wydajności strumienia powietrza.

Zespół instalacji mgły wodnej (6) składa się z zbiornika z wodą zdemineralizowaną (6.1) pompy wysokociśnieniowej (6.2), dyszy mgłowej (6.3), przewodów, zaworu regulacyjnego oraz manometru pomiarowego. Konstrukcja zespołu instalacji mgły wodnej umożliwia umieszczenie dyszy mgłowej (6.3) lub dysz w dowolnym miejscu komór badawczych. Zastosowano dyszę mgły wodnej pełno stożkową umożliwiające uzyskanie wielkości kropel w zakresie od około 20 µm do 750 µm.

Podstawowe dane zastosowanych urządzeń na stanowisku badawczym podano w poniższej tablicy (tabl. 5.3.).

				Parametry techniczne					
Nazwa urządzenia	Oznaczenie	Typ urządzenia	Producent	Wydajność nominalna	Ciśnienie statyczne	Maksymalna temperatura pracy	Stopień ochrony		
Wentylator nawiewny	3	WB 315	Dospel	1000 m <sup>3</sup> /h	80Pa	+42°C	IP54		
Wentylator wywiewny	4	KOM II 600	Dospel	550 m <sup>3</sup> /h	210 Pa	-20÷+150°C	IP54		
Wytwornica dymu	5.1	Antari F80	Antari	25 ml/min*	-	+150°C	IP54		
Pompa	6.2	EP5	Ulka	$650 \text{ cm}^3/\text{min}$	1,5 MPa	+25°C	-		
Dysza mgły wodnej	6.3	JJRP	Ikeuchi	0,36-1 dm <sup>3</sup> /min	1,0 MPa	+70°C	-		

T . I. I.	= -	D	4 <b>1 1</b>	- 1 /	- 1	1		1.		1 1	1	
Lani	<b>```</b>	Parametry	tecnniczne	orowny.	en urza	azen	zainstaiow	<i>anvcn</i>	na stanos	VISKII	nadawczy	m
1 401.	0.0.	1 urunieu y	teennezhe	Slowing	ui ui zų	uzen .	Zumsturo w	unyon	nu stuno	VIDICU	oudu wezy	

\*- zużycie płynu

## 5.2.4. Parametry paliwa użytego w badaniach

W przeprowadzonych badaniach jako paliwo został zastosowany ogólnie dostępny alkohol etylowy o zawartości etylenu około 80%, co odpowiada intensywność wydziałania ciepła około 360 kW/m<sup>2</sup>.

Charakterystyka paliwa:

1. Identyfikator produktu

Nazwa substancji:	alkohol etylowy
Nazwa chemiczna:	etanol
Masa cząsteczkowa:	61,83 [g/mol]
Wzór sumaryczny:	$C_2H_6O$

2. Klasyfikacja substancji

Klasyfikacja według rozporządzenia (EC) nr 1272/2008 [CLP/GHS]: Flam. Liq. 2, H225 Klasyfikacja zgodnie z Dyrektywą 67/548/EWG [DSD]: F, R11

Każdorazowo przed przystąpieniem do badań pojemnik, z którego pochodziła próbka alkoholu przeznaczonego do przygotowania paliwa został dokładnie wymieszany w celu uzyskania możliwie jednorodnego stężenia etanolu. Podczas przygotowań oraz w trakcie badań nie mieszano ze sobą alkoholi etylowych pochodzących od różnych dostawców.

## 5.2.5. Parametry badanych pożarów

Rodzaj paliwa, wymiary źródła pożaru w komorze badawczej (1.2) zostały ustalone w oparciu o informacje zawarte w normie AS 4391:1999 Smoke management systems – Hot smoke test [60] oraz własne badania próbne.



Rys. 5.13. Wykres zależności ilości wydzielanego ciepła od pola powierzchni paliwa [8].

W celu ustalenia podstawowych parametrów pożarów badawczych, które będą podlegały analizie zostały przeprowadzone testy i próby dla różnych wielkości pożarów w zakresie mocy całkowitej od 1,8 do około 25 kW.

Oznaczenia oraz podstawowe parametry przyjętych pożarów badawczych zostały zamieszczone w poniższej tablicy (tabl. 5.4.).

Oznaczenie pożaru	Wartość	Jednostka	Opis parametru			
	0,0125	m <sup>2</sup>	powierzchnia pożaru badawczego			
	0,40	m	obwód pożaru badawczego			
	360	kW/m <sup>2</sup>	gęstość wydzielającego się strumienia ciepła			
PB1	4,49	kW	całkowita moc pożaru			
	3,59	kW	konwekcyjna moc pożaru			
	60	°C	średnia obliczeniowa temperatura gazów pożarowych w warstwie podsufitowej			
	0,07	kg/s	średni obliczeniowy konwekcyjny strumień gazów pożarowych			
	0,0495	m <sup>2</sup>	powierzchnia pożaru badawczego			
	0,79	m	obwód pożaru badawczego			
	385	kW/m <sup>2</sup>	gęstość wydzielającego się strumienia ciepła			
PB2	19,04	kW	całkowita moc pożaru			
	15,23	kW	konwekcyjna moc pożaru			
	90	°C	średnia obliczeniowa temperatura gazów pożarowych w warstwie podsufitowej			
	0,15	kg/s	średni obliczeniowy konwekcyjny strumień gazów pożarowych			

Tabl. 5.4. Oznaczenia oraz podstawowe parametry przyjętych pożarów badawczych

# 5.2.6. Parametry instalacji wentylacji oddymiającej

System wentylacji oddymiającej jest to system łącznie dobranych elementów do odprowadzania dymu i ciepła, którego zadaniem jest utrzymanie warstwy ciepłych gazów pożarowych, unoszących się ponad chłodniejszym, czystym powietrzem. Zamontowany na stanowisku badawczym system wentylacji oddymiającej składa się z zespołu wentylatora nawiewnego (3) dostarczającego wymaganą ilość zewnętrznego powietrza kompensującego oraz zespołu wentylatorów wywiewnych (4) umożliwiających usuwanie z komory badawczej (1.2) gorących gazów pożarowych. Wydajności wentylatora nawiewnego (3), wentylatorów wywiewnych (4) oraz pola powierzchni otworów wywiewnych w stropie komory badawczej (1.2) zostały tak dobrane, że dla przyjętych mocy pożarów badawczych system umożliwiał utrzymanie pod stropem komory badawczej (1.2) warstwy ciepłych gazów pożarowych ponad chłodniejszym, czystym powietrzem.

Wyregulowanie oraz sprawdzenie wizualne poprawności funkcjonowania instalacji wentylacji oddymiającej jest możliwe dzięki zainstalowaniu zdejmowalnych szyb z jednaj strony komory badawczej. Użycie szklanych okien z jednej strony komory badawczej miało wyłącznie na celu uzyskanie możliwości precyzyjnego wyregulowana instalacji oraz potwierdzenia wyników obliczeń analitycznych.

W celu ustalenia podstawowych parametrów badawczych, które będą podlegały analizie zostały przeprowadzone testy i próby dla różnych wydajności instalacji wentylacji oddymiającej w zakresie od 100 m<sup>3</sup>/h do 720 m<sup>3</sup>/h.

Oznaczenia oraz podstawowe parametry badanych wariantów pracy systemu wentylacji oddymiającej komorę badawczą (1.2) zostały zamieszczone w poniższej tablicy (tabl. 5.6.).

Tabl. 5.5.	Oznaczenia	oraz podstav	wowe parame	try waria	antów pracy	v systemu	wentylacji	oddymia	ającej
			(SHEVS) w l	komorze	badawczej				

Oznaczenie wariantu pracy SHEVS	Wartość	Jednostki	Opis parametru
	360	m <sup>3</sup> /h	łączny strumień objętości powietrza nawiewanego do komory badawczej (1.2) (powietrze kompensujące)
SHEVS1	360	m <sup>3</sup> /h	łączny strumień objętości gazów pożarowych usuwanych z komory badawczej (1.2) (oddymianie)
	303	1/h	ilość wymian powietrza w komory badawczej (1.2)
	0,5	m/s	średnia prędkości powietrza nawiewanego w otworze wejściowym do komory badawczej (1.2)
	180	m <sup>3</sup> /h	łączny strumień objętości powietrza nawiewanego do komory badawczej (1.2) (powietrze kompensujące)
SHEVS2	180	m <sup>3</sup> /h	łączny strumień objętości gazów pożarowych usuwanych z komory badawczej (1.2) (oddymianie)
	151	1/h	ilość wymian powietrza w komory badawczej (1.2)
	0,25	m/s	średnia prędkości powietrza nawiewanego w otworze wejściowym do komory badawczej (1.2)
	140	m <sup>3</sup> /h	łączny strumień objętości powietrza nawiewanego do komory badawczej (1.2) (powietrze kompensujące)
SHEVS3	140	m <sup>3</sup> /h	łączny strumień objętości gazów pożarowych usuwanych z komory badawczej (1.2) (oddymianie)
	118	1/h	ilość wymian powietrza w komory badawczej (1.2)
	0,20	m/s	średnia prędkości powietrza nawiewanego w otworze wejściowym do komory badawczej (1.2)

#### 5.2.7. Parametry instalacji mgły wodnej

Zdecydowana większość systemów mgły wodnej aktualnie stosowanych w budynkach umożliwia uzyskanie wielkości kropel w zakresie od około 20  $\mu$ m do 800  $\mu$ m (0,02÷0,8mm). Na stanowisku badawczym została zamontowana instalacja mgły wodnej wyposażona w dyszę typu JJRP firmy Ikeuchi (rys. 5.14 – 5.15.). Zgodnie z danymi producenta wielkość charakterystycznej kropli przy wartości ciśnienia 1MPa (10bar) wynosi odpowiednio Dv<sub>0,90</sub>=260 $\mu$ m. Oznacza to, że 90% objętości rozpylonej wody będą stanowiły krople wody o średnicy od 0 do 260  $\mu$ m. Kąt rozpylania wody przez dyszę zależy od wartości ciśnienia wody i zawiera się w przedziale od 56° do 60° stopni.



Rys. 5.14. Widok pracującej dyszy mgły wodnej



Rys. 5.15. Poglądowy widok pomiaru zasięgu pracującej dyszy mgły wodnej

Zmniejszenie wartości ciśnienia wody przed dyszą powoduje nieznaczny wzrost wartości wielkość charakterystycznej kropli  $Dv_{0,90}$ . Wyłącznie w celach poglądowych szacunkową zmianę wielkości kropel rozpylanej wody w funkcji zmian ciśnienia wody przed dyszą dokonano w oparciu o metodę mikrofotografii cyfrowej z wykorzystaniem ogólnie dostępnego oprogramowania do analizy zdjęć. Ustalono, że przy wartości ciśnienia 0,3 MPa wartości wielkość charakterystycznej kropli  $Dv_{0,90}$  wynosi około 340 µm.

Elementy składowe instalacji mgły wodnej zamontowanej na stanowisku badawczym zostały pokazane na poniższej fotografii. Główne elementy to zbiornik zasilający z wodą zdemineralizowaną, pompa wysokociśnieniowa, dysza mgły wodnej, przewody, zawór regulacyjny oraz zbiornik magazynujący nadmiar wody.

Na rysunku 5.16 przedstawiono widok instalacji mgły wodnej oraz elementów składowych.



oznaczenia:

- 6.1. zbiornik zasilający z wodą zdemineralizowaną,
- 6.2. pompa,
- 6.3. dysza mgły wodnej,
- 6.4. zawór regulacyjny,
- 6.5. zbiornik magazynujący,
- 6.6. manometr.



W celu wyznaczenia indywidualnych charakterystyk zmontowanej instalacji mgły wodnej dokonano szeregu prób, testów, badań końcowych w oparciu o wyniki, których opracowano poniższe wykresy. Na rys. 5.17. został przedstawiony wykres charakterystyki hydraulicznej instalacji mgły wodnej zamontowanej na stanowisku badawczym. Natomiast na rys. 5.18. pokazano wykres zależności zasięgu dyszy mgły wodnej w zależności od wartości ciśnienia.



Rys. 5.17. Wykres charakterystyki hydraulicznej instalacji mgły wodnej zamontowanej na stanowisku badawczym



Rys. 5.18. Wykres zasięgu dyszy mgły wodnej zamontowanej na stanowisku badawczym

Konstrukcja zastosowanej instalacji mgły wodnej umożliwia umieszczenie dyszy mgłowej (6.3) w dowolnym położeniu na stanowisku badawczym. Wstępnie przebadano współdziałanie instalacji oddymiającej z dwa wariantami lokalizacji dyszy mgłowej. W wariancie pierwszym oznaczonym jako DM1 dysza mgłowa została umieszczona bezpośrednio nad otworem wejściowym do komory badawczej (1.2). W wariancie drugim oznaczonym jako DM2 dysza mgłowa została umieszczona bezpośrednio w otworze nawiewnym systemu wentylacyjnego (3) w komorze nawiewnej (1.1). Badane warianty umieszczenia dysz pokazano na poniższych rysunkach (rys. 5.19. i rys. 5.20.).



Rys. 5.19. Schemat stanowiska badawczego. Pierwszy wariant badania systemu mgły wodnej (DM1)



Rys. 5.20. Schemat stanowiska badawczego. Drugi wariant badania systemu mgły wodnej (DM2)

Ze względu na korzystniejsze wartości uzyskanych wyników testowych badań próbnych efektywności współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej w wariancie pierwszym (DM1), dalsze, szczegółowe badania zostały przeprowadzone dla tego wariantu. Oznaczenia oraz parametry badanych wariantów wydajności instalacji mgły wodnej zostały zamieszczone w poniższej tablicy (tabl. 5.6).

Oznaczenie wariantu pracy systemu mgly wodnej	Wartość	Jednostka	Opis parametru	
	0,15	dm <sup>3</sup> /min	łączny strumień objętości wody rozpylany w komorze badawczej (1.2)	
SMW1	0,30	MPa	średnie ciśnienie wody przed dyszą	
	ok. 60°	0	teoretyczny kąt rozpylania wody	
	0,30	dm <sup>3</sup> /min	łączny strumień objętości wody rozpylany w komorze badawczej (1.2)	
SMW2	0,60	MPa	średnie ciśnienie wody przed dyszą	
	ok. 60°	0	teoretyczny kąt rozpylania wody	
	0,45	dm <sup>3</sup> /min	łączny strumień objętości wody rozpylany w komorze badawczej (1.2)	
SMW3	1,20	MPa	średnie ciśnienie wody przed dyszą	
	ok. 50°	0	teoretyczny kąt rozpylania wody	

Tabl. 5.6. Oznaczenia oraz podstawowe parametry badanych wariantów pracy instalacji mgły wodnej

Przeprowadzone badania próbne oraz badania podstawowe obejmowały znacznie szerszy zakres zmian strumień objętości wody rozpylany w komorze badawczej (1.2).

## 5.2.8. Parametry przyrządów pomiarowych

Pomiarów parametrów powietrza, wody oraz gazów pożarowych dokonano za pomocą przyrządów pomiarowych, których podstawowe dane techniczne zostały zamieszczone w poniższej tablicy (tabl. 5.7.).

Tabl.	5.7.1	Parametry	techniczne	głównych	n przyrzadów	v pomiarowyc	h używanych na	a stanowisku badawczym
				810	. przyrząwo i	, pointaro n je		, beario il ibila o ada il o Egin

Nazwa przyrządu	Тур	Producent	Zakres	Rozdzielczość	Dokładność	Świadectwo kalibracji
Mikromanometr cieczowy	M100R/G	KFM	-0,1÷1,5 MPa	0,1 MPa	klasa 1,6	Kalibracja fabryczna
Termometr	Pen-shaped	Mera	-50÷+150 °C	0,1 °C	±1°C	Kalibracja fabryczna
Termoanemometr	CFM Master 8901	AZ Instrument	0÷35 m/s -10÷+50 °C	0,01 m/s 0,1 °C	±2% m/s ±0,6 °C	Kalibracja fabryczna
Uniwersalny przyrząd pomiarowy	Testo 435-4 sonda nr 0635 1535	Testo	-20÷+70 °C 0÷100 %RH 0÷+20 m/s 0÷100 hPa	0,1 °C 0,1 %RH 0,01 m/s 1 Pa	±0,3 °C ±2 %RH (+2÷+98 %RH) ±0.03 m/s +4%	Kalibracja fabryczna
Analizator spalin	KIGAZ 150	Kimo	-20÷+100°C (otoczenie) -100÷+1250°C (spaliny) 0÷+99°Ctd (p. rosy) -200÷+200 hPa	0,1 °C (otoczenie) 0,1 °C (spaliny) 0,1 °C (p. rosy) 0,01 hPa 0,1%	$\begin{array}{c} \pm 0.5 \ ^{\circ}\text{C} \\ \pm 1,1 \ ^{\circ}\text{C} \\ \text{obl.} \\ \pm 0.5\% \\ \pm 0.2\% \\ \pm 5\% \end{array}$	NºNAG 1400013
Pirometr	PDT1	Bosch	-20÷+220°C	0,1 °C	±1 °C	Kalibracja fabryczna
Kamera termowizyjna	EasIR-4	Szbroad Technology	-20÷+350°C	0,1 °C	±2°C	Nr 0900787
Termopary	Тури К	Apar	-50÷+1300°C	0,1 °C	±2°C	Kalibracja fabryczna

Pomiarów prędkości powietrza dokonano przy pomocy anemometru skrzydełkowego typu CFM Master 8901 wykorzystując metodę zawartą w normie PN-ISO 5221:1994.

Wszystkie parametry pomierzono co najmniej dwukrotnie za pomocą odrębnych przyrządów pomiarowych.

## 5.2.9. Rachunek błędów

Na każdy rzeczywisty wynik pomiaru składa się wartość prawdziwa mierzonej wielkości, wartość systematycznego błędu pomiaru oraz błąd przypadkowy pomiaru. Przy ustalaniu ostatecznych średnich wartości pomierzonych parametrów uwzględniono wpływ błędów pomiarowych.

#### Błąd pomiaru temperatury

Część pomiarów temperatury została wykonana przy użyciu termopar typu K. W celu zwiększenia dokładności pomiaru, wszystkie termoelementy połączono różnicowo. Sprawdzenia dokładności pomiarów temperatury poszczególnych termoelementów dokonano przy użyciu przyrządu KIGAZ 150, który posiada świadectwo kalibracji o symbolu NoNAG 1400013. Przeprowadzenie cechowania poszczególnych termopar ujawniło, że charakterystyki poszczególnych termopar są przesunięte w stosunku do pomiarów wzorcowych. Zakres przesunięcia wynosił odpowiednio od -0,7°C do około +0,9°C. Błędy systematyczne zostały uwzględnione przy analizie wyników pomiarów, natomiast średnie niepewności pomiarów temperatury przez termopary wynoszą:

- $+20^{\circ}$ C wartość  $\pm 0,2^{\circ}$ C
- $+50^{\circ}$ C wartość  $\pm 0,2^{\circ}$ C
- $+80^{\circ}$ C wartość  $\pm 0,4^{\circ}$ C
- +100°C wartość ±0,5°C
- $+150^{\circ}$ C wartość  $\pm 0.8^{\circ}$ C

## Błąd pomiaru prędkości powietrza

Do pomiarów prędkości i ilości powietrza został wykorzystany termoanemometr typu CFM Master 8901. Sprawdzenia dokładności pomiarów prędkości powietrza dokonano przy użyciu przyrządu Testo 435-4 z sondą nr 0635 1535 na stanowisku badawczym. Przeprowadzenie sprawdzenie ujawniło, że charakterystyka używanego termoanemometr jest przesunięta w stosunku do pomiarów wzorcowych. Zakres przesunięcia wynosił odpowiednio od -0,05 m/s do około +0,12 m/s. Średnie niepewności pomiarów prędkości powietrza wynoszą:

 $0,00 \text{ m/s} \text{ wartość } \pm 0,01 \text{ m/s}$ 

0,60 m/s wartość  $\pm$ 0,03 m/s

1,10 m/s wartość  $\pm 0,05$  m/s

 $2,50 \text{ m/s} \text{ wartość } \pm 0,08 \text{ m/s}$ 

- 3,40 m/s wartość  $\pm 0,06$  m/s
- 5,60 m/s wartość  $\pm 0,10$  m/s

Po uwzględnieniu wartości niepewności pomiaru prędkości powietrza pomiarowego przyrządu sprawdzającego ( $\pm 0.03 \text{ m/s} + 4\%$ ) oraz zsumowaniu niepewności pomiarów prędkości powietrza ostatecznie otrzymano niepewność maksymalną o wartości około  $\pm 0.06 \text{ m/s}$  w przedziale prędkości powietrza od 0,00 m/s do 6 m/s.

# 5.3. Metodyka badań

W celu wyznaczenia zależności  $\eta_{\Delta T} = f(\dot{m}_w/\dot{m}_p)$  zostały przeprowadzone badania i pomiary (tab. 5.8.) polegające na określeniu stopnia efektywności obniżenia temperatury w komorze badawczej (1.2), stopnia efektywności obniżenia temperatury usuwanych gazów pożarowych, stopnia efektywności obniżenia temperatury przegród budowlanych w zależności od strumieni masowych powietrza usuwanego przez instalację wentylacji oddymiającej oraz strumienia masowego mgły wodnej wytwarzanego przez instalację mgły wodnej. Wyznaczenie efektywności redukcji temperatury w przestrzeni komory badawczej oraz temperatury gazów pożarowych zostało przeprowadzone przy włączonej i wyłączonej instalacji mgły wodnej.

Oznaczenie	Jednostka	Opis parametru	Przyrząd pomiarowy	
t	°C	temperatura	termometr	
р	Pa, $N/m^2$	ciśnienie	mikromanometr	
b <sub>at</sub>	Pa, $N/m^2$	ciśnienie atmosferyczne	barometr	
φ	%	wilgotność względna	higrometr	
W	m/s	prędkość powietrza	anemometr	
V	m <sup>3</sup> /s	strumień objętości powietrza	anemometr	
n <sub>s</sub>	-	skład gazów pożarowych	analizator spalin	
Ծ	S	czas pomiarów	stoper	

Tabl. 5.8.	Parametry	mierzone	za pomocą	przyrządów	pomiarow	ych
------------	-----------	----------	-----------	------------	----------	-----

Oznaczenie wykonanego wariantu badania i jego podstawowy zakres zamieszczono w poniższej tablicy (tabl. 5.9).

Tabl. 5.9. Oznaczenia i zakres wykonanych badań na stanowisku badawczym.

Oznaczenie badania	Pożar badawczy	Wariant pracy systemu wentylacji oddymiającej	Wariant pracy systemu mgły wodnej	Początkowe parametry powietrza	Parametry powietrza i gazów pożarowych w funkcji czasu
B1	PB1	-	-	$t_{zew},t_{wew},\phi_{wew},w_{wew}$	T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub> , T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub> , P <sub>AS</sub>
B2	PB2	-	-	$t_{zew},t_{wew},\phi_{wew},w_{wew}$	T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub> , T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub> , P <sub>AS</sub>
B3	PB2	SHEVS2	-	$t_{zew},t_{wew},\phi_{wew},w_{wew}$	$T_1, T_2, T_3, T_4, P_{AS}$
B4	PB2	SHEVS3	-	$t_{zew},t_{wew},\phi_{wew},w_{wew}$	T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub> , T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub> , P <sub>AS</sub>
B5	PB2	SHEVS2	SMW1	$t_{zew},t_{wew},\phi_{wew},w_{wew}$	T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub> , T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub> , P <sub>AS</sub>
B6	PB2	SHEVS2	SMW2	$t_{zew},t_{wew},\phi_{wew},w_{wew}$	T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub> , T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub> , P <sub>AS</sub>
B7	PB2	SHEVS2	SMW3	$t_{zew},t_{wew},\phi_{wew},w_{wew}$	$T_1, T_2, T_3, T_4, P_{AS}$
B8	PB2	SHEVS3	SMW1	$t_{zew},t_{wew},\phi_{wew},w_{wew}$	T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub> , T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub> , P <sub>AS</sub>
B9	PB2	SHEVS3	SMW2	$t_{zew}, t_{wew}, \phi_{wew}, w_{wew}$	$T_1, T_2, T_3, T_4, P_{AS}$
B10	PB2	SHEVS3	SMW3	$t_{zew}, t_{wew}, \phi_{wew}, w_{wew}$	$T_1, T_2, T_3, T_4, P_{AS}$

gdzie:

PB1, PB2 - oznaczenie pożaru badawczego

SHEVS1, SHEVS2 - oznaczenie wariantu pracy systemu wentylacji oddymiającej

SMW1, SMW2 - oznaczenie wariantu pracy systemu mgły wodnej

 $\begin{array}{l} t_{zew},\,t_{wew}-temperatury \,powietrza\\ \phi_{zew} - wilgotność względna powietrza\\ w_{wew} - prędkość powietrza\\ T_1,\,T_2,\,T_3,\,T_4-pomiary termoparami\\ P_{AS}-pomiary \,analizatorem \,spalin \end{array}$ 

Załączenie systemu wentylacji oddymiającej i systemu mgły wodnej w każdym wariancie pracy odbywało się po upływie około 20 sekund od momentu zainicjowania pożaru.

Wartość stosunku strumienia masy wody  $V_w$  użytej do wytwarzania mgły wodnej do strumienia masy powietrza kompensującego  $V_p$  wynosiła od 0,05  $\cdot$  10<sup>-3</sup> do 0,25  $\cdot$  10<sup>-3</sup>.

# 5.4. Przebieg i wyniki badań

Na początku zostały wykonane badania wstępne, które miały na celu określanie niezbędnej liczby badań i serii pomiarowych. W poniższej tabeli (tab. 5.10) podano pomierzone parametry warunków zewnętrznych i wewnętrznych.

Tabl. 5.10. Uśrednione pomierzone parametry atmosferycznych warunków zewnętrznych i wewnętrznych

Oznaczenie	Wartość początkowa	Jednostka	Opis parametru	Przyrząd pomiarowy
t <sub>zew</sub>	+28	°C	średnia temperatura zewnętrzna	termometr
t <sub>wew</sub>	+27	°C	średnia temperatura wewnętrzna pomieszczenia	termometr
t <sub>wew</sub>	+26	°C	średnia temperatura wewnętrzna komory badawczej	termometr
b <sub>at</sub>	1000	hPa	ciśnienie atmosferyczne	barometr
φ <sub>zew</sub>	57	%	średnia wilgotność względna powietrza zewnętrznego	higrometr
$\phi_{wew}$	57	%	średnia wilgotność względna powietrza wewnętrznego	higrometr
Wzew	5,5	m/s	średnia prędkość powietrza na zewnątrz	anemometr
Wwew	0,3	m/s	średnia prędkość powietrza w pomieszczeniu	anemometr

Poniżej, w tablicy (tabl. 5.11) został pokazany przykładowy arkusz dokumentujący wykonane pomiary.

Oznaczenie	Parametry początkowe powietrza			Parametry powietrza i gazów pożarowych							
badania	t <sub>wew</sub>	$\phi_{wew}$	Wwew	Շ	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	$T_4$	T <sub>SP</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
	[°C]	[%]	[m/s]	[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[ppm]	[%]
B4.1	24	56	0,1	30	29,8	42,5	53,4	79,0	-	-	-
				60	36,5	46,3	60,6	77,8	-	-	-
				90	37,7	46,1	60,7	71,2	-	-	-
				120	38,1	47,6	61,3	74,4	-	-	-
				150	38,9	48,5	63,5	85,4	-	-	-
				180	39,7	49,7	64,2	79,7	-	-	-
				210	39,9	50,1	60,2	78,3	-	-	-
				240	40,4	49,5	65,8	79,9	56,1	5	0,5
				270	-	-	-	-	-	-	-

Tabl. 5.11. Przykładowy arkusz pomiarowy

gdzie:

 $t_{wew}$  – temperatury powietrza

 $\phi_{wew}$  - wilgotność względna powietrza

wwww - prędkość powietrza

T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub> – pomiary termoparami

T<sub>SP</sub> - pomiar temperatury spalin analizatorem spalin

CO - stężenie tlenku węgla w spalinach

CO2 - stężenie dwutlenku węgla w spalinach

## 5.5. Analiza wyników badań

Efektywność redukcji temperatury wyznaczono wykorzystując następujące zależność:

1. efektywność redukcji temperatury w dolnej przestrzeni komory badawczej:

$$\eta_{\Delta TK} = \frac{T_{K1} - T_{K2}}{T_{K1}}$$
(5.1)

gdzie:

 $T_{K1}$ – średnia pomierzona temperatura powietrza bez działającej instalacji mgły wodnej  $T_{K2}$ – średnia pomierzona temperatura powietrza z działającą instalacją mgły wodnej

2. efektywność redukcji temperatury gazów pożarowych pod stropem komory badawczej:

$$\eta_{\Delta TS} = \frac{T_{S1} - T_{S2}}{T_{S1}}$$
(5.2)

gdzie:

 $T_{S1}$ – średnia pomierzona temperatura dymów bez działającej instalacji mgły wodnej  $T_{S2}$ – średnia pomierzona temperatura dymów z działającą instalacją mgły wodnej

3. efektywność redukcji temperatury przegród budowlanych:

$$\eta_{\Delta TB} = \frac{T_{B1} - T_{B2}}{T_{B1}}$$
(5.3)

gdzie:

 $T_{S1}$ – średnia pomierzona temperatura przegrody bez działającej instalacji mgły wodnej  $T_{S2}$ – średnia pomierzona temperatura przegrody z działającą instalacją mgły wodnej

Wybrane wyniki analiz i obliczeń porównawczych przeprowadzone w oparciu o dokonane pomiary na stanowisku badawczym zostały zamieszczone na poniższych rysunkach (rys. 5.21 - 5.25.).



**Rys. 5.21.** Wykres efektywności redukcji temperatury η<sub>ΔTK</sub> w zależności od czasu przy stałej wydajności instalacji oddymiającej V=180 m<sup>3</sup>/h, temperaturze powietrza zewnętrznego 27°C i temperaturze rozpylanej wody 19°C



**Rys. 5.22.** Wykres efektywności redukcji temperatury η<sub>ΔTK</sub> w zależności od czasu przy stałej wydajności instalacji oddymiającej V=140 m<sup>3</sup>/h, temperaturze powietrza zewnętrznego 27°C i temperaturze rozpylanej wody 19°C



Rys. 5.23. Wykres efektywności redukcji temperatury η<sub>∆TS</sub> w zależności od czasu przy stałej wydajności instalacji oddymiającej V=180 m<sup>3</sup>/h, temperaturze powietrza zewnętrznego 27°C i temperaturze rozpylanej wody 19°C



Rys. 5.24. Wykres efektywności redukcji temperatury η<sub>∆TS</sub> w zależności od czasu przy stałej wydajności instalacji oddymiającej V=140 m<sup>3</sup>/h, temperaturze powietrza zewnętrznego 27°C i temperaturze rozpylanej wody 19°C



**Rys. 5.25.** Wykres efektywności redukcji temperatury η<sub>ΔTB</sub> w zależności od czasu przy stałej wydajności instalacji oddymiającej V=180 m<sup>3</sup>/h, temperaturze powietrza zewnętrznego 27°C i temperaturze rozpylanej wody 19°C

Analizę korelacji efektywności redukcji temperatury w funkcji stosunku strumienia masy mgły wodnej i powietrza przeprowadzono w oparciu o współczynnik korelacji linowej Pearsona [62].

$$R_{xy} = \frac{cov(x, y)}{s(x)s(y)}$$
(5.4)

gdzie:

Rxy-współczynnik korelacji liniowej Pearsona,

cov(x,y) – kowariancja zmienny,

s(x) – odchylenie standardowe zmiennej x,

s(y) – odchylenie standardowe zmiennej y.

Zbadanie istotności współczynnik korelacji liniowej Pearsona ze względu na małą próbę zostało przeprowadzone zgodnie z poniższymi wzorami (test t) i hipotezami.

$$t = \frac{R_{xy}}{\sqrt{1 - R_{xy}^2}} \cdot \sqrt{n - 2}$$
(5.5)

gdzie:

R<sub>xy</sub> – współczynnik korelacji liniowej Pearsona, n – liczba prób.

Przyjęto następujące hipotezy do weryfikacji: hipoteza zerowa H<sub>0</sub>:  $\rho_{xy}=0$ , wobec przy dwustronnej hipotezie alternatywnej H<sub>1</sub>:  $\rho_{xy}=0$ .

Wartości krytyczne t<sub>kr</sub> zostały każdorazowo odczytane z tablic rozkładu t-Studenta dla poziomu istotności 0,01. Jeśli obliczona na podstawie danej próby wartość spełniania nierówność  $|t| \ge t_{kr}$  to w takim przypadku hipoteza zerowa została odrzucona, natomiast w przeciwnym nie była odrzucenia. Wyniki przeprowadzonych analiz statystycznych zostały zawarte w poniższych tablicach ( tabl. 5.13. i tabl. 5.14.).

**Tabl. 5.13.** Wyniki analizy statystycznej efektywności redukcji temperatury  $\eta_{\Delta TK}$  w zależności od ilorazu strumieni<br/>masowych mgły wodnej i powietrza

Oznaczenie	Wartość	Opis parametru		
R	0,7253	współczynnik korelacji liniowej Pearsona		
R <sup>2</sup>	0,5260	współczynnik determinacji		
t	3,3314	wartość obliczona statystyki		
t <sub>kr</sub>	3,1690	wartość krytyczna statystyki		
H <sub>0</sub>	odrzucona	hipotezy: $H_0$ : $\rho_{xy}=0$ , wobec $H_1$ : $\rho_{xy}\neq 0$		

Odrzucenie hipotezy zerowej  $H_0$ :  $\rho_{xy}=0$  oznacza, że związek między zmiennymi jest statystycznie istotny.



**Rys. 5.26.** Wykres efektywności redukcji temperatury  $\eta_{\Delta TK}$  w zależności od ilorazu strumieni masowych mgły wodnej i powietrza przy temperaturze powietrza zewnętrznego 27°C i temperaturze rozpylanej wody 19°C

Tabl. 5.14. Wyniki analizy statystycznej efektywności redukcji temperatury $\eta_{\Delta TS}$ w zależności od ilora	zu strumieni
masowych mgły wodnej i powietrza.	

Oznaczenie	Wartość	Opis parametru	
R	0,7244	współczynnik korelacji liniowej Pearsona	
$\mathbb{R}^2$	0,5248	współczynnik determinacji	
t	3,3231	wartość obliczona statystyki	
t <sub>kr</sub>	3,1690	wartość krytyczna statystyki	
H <sub>0</sub>	odrzucona	hipotezy: H <sub>0</sub> : $\rho_{xy}=0$ , wobec H <sub>1</sub> : $\rho_{xy}\neq 0$	

Odrzucenie hipotezy zerowej  $H_0$ :  $\rho_{xy}=0$  oznacza, że związek między zmiennymi jest statystycznie istotny.



**Rys. 5.27.** Wykres efektywności redukcji temperatury  $\eta_{\Delta TS}$  w zależności od ilorazu strumieni masowych mgły wodnej i powietrza przy temperaturze powietrza zewnętrznego 27°C i temperaturze rozpylanej wody 19°C.

Przeprowadzona analiza statystyczna otrzymanych wyników pomiarów świadczy o nie liniowym charakterze pomiędzy parametrami. Na rys. 5.26. i 5.27. przedstawiono wykresy efektywności redukcji temperatury w zależności od wartości ilorazów strumieni masowych mgły wodnej i powietrza. Największą efektywność redukcji temperatury można zaobserwować przy wartościach ilorazu strumieni masowych mgły wodnej i powietrza w zakresie od  $0,12 \cdot 10^{-3}$  do  $0,20 \cdot 10^{-3}$ . Przy czym obliczeniowe wartości maksymalne wynoszą odpowiednio:

-  $\eta_{\Delta TK}$ =46% jest osiągana dla wartości ilorazu wynoszącego 0,15·10<sup>-3</sup>,

-  $\eta_{\Delta TS}$ =48% jest osiągana dla wartości ilorazu wynoszącego 0,15·10<sup>-3</sup>.

# 6. OBLICZENIA NUMERYCZNE

# 6.1. Model numeryczny zjawisk w komorze badawczej

## 6.1.1. Ogólny opis modelu

Obliczeniowe modele pożarów umożliwiają stosunkowo dokładną analizę, weryfikację faz, warunków rozwoju pożaru oraz procesów fizykochemicznych za pomocą fizycznych lub matematycznych opisów.

Jak już wspomniano wcześniej, modele matematyczne rozwoju pożaru można podzielić na modele probabilistyczne (statystyczne) i deterministyczne. Modele probabilistyczne zakładają, że pożar rozpatrywany jest jako seria kolejnych zdarzeń następujących po sobie z pewnym prawdopodobieństwem [35]. Modele deterministyczne oparte są na prawach fizycznych, termodynamicznych i chemicznych.

Otrzymane wyniki badań na autorskim stanowisku badawczym zostały porównane z wynikami otrzymanymi po przeprowadzeniu obliczeń numerycznych z wykorzystaniem techniki numerycznej mechaniki płynów CFD (ang. akronim CFD tj. Computational Fluid Dynamics).

Do przeprowadzenia analizy numerycznej rozwoju pożaru został wykorzystany model polowy. Przedmiotowy model opiera się na równaniach mechaniki płynów oraz termodynamiki [63]. Przestrzeń poddana analizie została podzielona na małe obszary przestrzenne (komórki), dla których numerycznie rozwiązane zostały układy równań różniczkowych [64]. Analizie w funkcji czasu poddawana została przestrzeń pożaru (w osiach x,y,z) i zdefiniowane strefy sąsiednie, ale również parametry powietrza wewnątrz komory badawczej (1.2), elementy przegród stanowiska badawczego itp.

Obliczenia numeryczne zostały wykonane przy użyciu programu komputerowego FDS (Fire Dynamics Simulator), który powstał i jest rozwijany przez National Institute of Standards and Technology (NIST) w Stanach Zjednoczonych, przy współpracy z fińskim instytutem naukowobadawczym VTT.

W tym miejscu należy zaznaczyć, że mimo szybkiego rozwoju technik obliczeniowych CFD przeprowadzone w niniejszym rozdziale obliczenia będą obliczeniami uproszczonymi, zawierającymi przybliżone rozwiązania badanego problemu oraz zjawisk fizykochemicznych.

Program FDS [65], podobnie jak zdecydowana większość programów CFD (np. Fluent itp.) umożliwia obliczeniowe wyznaczanie równań Navier-Stokes'a. Obliczenia konkretnych wartości równań Navier-Stokes'a oparte jest na wykorzystaniu metod dyskretyzacji (metoda skończonych objętości FVM (ang. Finite Volume Method), metoda elementów skończonych FEM (ang. Finite Element Method) oraz metoda różnic skończonych FDM (ang. Finite Difference Method)). Dodatkowo w przypadku obliczeń numerycznych związanych z rozwojem pożaru zostaną uwzględnione procesy fizykochemiczne spalania, przewodzenia i rozprzestrzeniania się promieniowania cieplnego itp. [65].

Podstawę obliczeń numerycznych stanowią prawo zachowania masy, prawo zachowania pędu, prawo zachowania energii oraz prawo stanu gazu doskonałego. Układ równań różniczkowych będzie przedstawiał się następująco:

Prawo zachowania masy (równanie zachowania ciągłości):

$$\operatorname{div}(\vec{v}) = \mathbf{0} \tag{6.1}$$

Prawo zachowania pędu (równanie Navier-Stokes'a):

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \nabla \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + v \nabla^2 \vec{v} + \vec{f}$$
(6.2)

Prawo zachowania energii (równanie wymiany ciepła):

$$\rho c_{p} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_{p} (\nabla T) \vec{v} = \kappa \nabla T$$
(6.3)

Prawo stanu gazu doskonałego (równanie stanu gazu doskonałego)

$$pV = nRT \Longrightarrow p = \frac{\rho RT}{\overline{W}}$$
(6.4)

gdzie:

c<sub>p</sub> – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu

ρ – gęstość płynu

- $\kappa$  współczynnik przewodzenia
- v współczynnik lepkości kinematycznej
- f siła masowa

 $\vec{v}$  - prędkość

T, t - temperatura

p - ciśnienie

R – uniwersalna stała gazowa

Powyższe równania opisują wzajemne powiązania prędkości, ciśnienia, temperatury oraz gęstości poruszającego się płynu. Zmiennymi niezależnymi są wymiary układu współrzędnych domeny obliczeniowej oraz czas. Natomiast zmiennymi zależnymi są trzy składowe wektora prędkości płynu, gęstość, temperatura oraz ciśnienie płynu.

Obliczenia numeryczne równań Navier-Stokes'a w celu uzyskania rozwiązań były prowadzone z uwzględnieniem modelu turbulencji LES ( ang. LES – Large Eddy Simulation). Model LES zakłada uśrednianie wpływu oddziaływania małych wirów, które są niezależne od geometrii badanego przepływu płynu. Oddziaływania małych wirów powstających podczas przepływu płynu zostały uwzględnione przez dodanie członów dodatkowych naprężeń podczas poszukiwania rozwiązań dla wirów dużych, które w dużej mierze zależą od indywidulanej geometrii badanego przepływu oraz warunków brzegowych.

Podstawowymi wielkościami wejściowymi omawianego modelu matematycznym były:

- ilość i intensywność wydzielanego ciepła,
- ilość energii przekazana podczas odparowania,
- strumień ciepła przekazywany na drodze przewodzenia,
- strumień ciepła przekazywany na drodze promieniowania,
- tensor naprężeń lepkości tj. stała empiryczna C<sub>s</sub> wyznaczona wg podejścia Smagorinsky'ego,
- parametry dyfuzyjne tj. przewodność cieplna, właściwości materiałów itp.

Podstawowymi wielkościami wyznaczanymi w wyniku przeprowadzenia obliczeń numerycznych były:

- składowe wektora prędkości płynów,
- gęstość,
- ciśnienie,
- entalpia.

Zasada działania algorytmu obliczeniowego w przyjętym modelu matematycznym polega na wyznaczeniu wartości początkowych obliczanych parametrów, a następnie ponownym wyznaczeniu wartości skorygowanych dla tych samych wielkości z uwzględnieniem zadanych wcześniej ogólnych zasad obliczeń.

Cała domena obliczeniowa była podzielona na prostopadłościenne komórki o dokładnie takich samych wymiarach. Pojedyncza domena obliczeniowa miała również kształt prostopadłościenny (rys. 6.1.).



**Rys. 6.1.** Poglądowy podział domeny obliczeniowej na komórki obliczeniowe

Położenie każdej komórki w domenie obliczeniowej zostało zdefiniowane w układzie współrzędnych x, y i z. Dla geometrycznego środka każdej komórki zostały określone wielkości skalarne np. gęstość n-tego kroku czasowego. Natomiast wielkości wektorowe zdefiniowano dla płaszczyzn zewnętrznych każdej komórki (np. prędkość). Przyjęty model matematyczny umożliwia konwekcyjną i dyfuzyjną wymianę masy między poszczególnymi komórkami domeny obliczeniowej.

## 6.1.2. Metodyka obliczeń numerycznych

Obliczenia numeryczne są aktualnie jedną z metod analizy wyników uzyskanych na drodze badań eksperymentalnych w dużej i malej skali. Podstawowym celem wykonanych obliczeń numerycznych było potwierdzenie istnienia zależności skuteczności obniżenia temperatury w pomieszczeniu podczas pożaru od parametrów mediów doprowadzanych do pomieszczenia (tj. strumienia objętości powietrza kompensującego, strumienia objętości mgły wodnej) i usuwanych z pomieszczenia (tj. strumienia objętości usuwanych dymów i gazów pożarowych) zauważonych podczas przeprowadzania badań. Przeprowadzenie obliczeń numerycznych umożliwiających odwzorowanie zjawisk obserwowanych na autorskim stanowisku badawczym wymagało doboru odpowiedniego kodu obliczeniowego oraz opracowania metodologii przeprowadzania obliczeń.

W pierwszym etapie wyniki obliczeń numerycznych dla pożaru PB1 zostały porównane z wynikami otrzymanymi w trakcie badań eksperymentalnych. W drugim etapie weryfikacji wyniki obliczeń numerycznych został porównany jeden z wariantów współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej z wynikami otrzymanymi w trakcie badań eksperymentalnych.

Takie podejście zagwarantowało potwierdzenie wiarygodności stworzonych modeli matematycznych. Uzyskana wiarygodność obliczeń numerycznych umożliwiała pogłębioną analizę wyników otrzymanych na autorskim stanowisku badawczym oraz pozwoliła na rozszerzenie zakresu badań i analiz dla skali rzeczywistej.

## 6.1.3. Oprogramowanie do obliczeń numerycznych

Obliczenia numeryczne zostały wykonane przy wykorzystaniu programu Fire Dynamics Simulator (FDS) wersja 5.5.3 z listopada 2010r. Program FDS jest programem stworzonym i rozwijanym przez National Institute of Standards and Technology (NIST) oraz fiński instytut naukowo-badawczy VTT Technical Research Centre. Program umożliwia numeryczną analize zjawisk fizycznych i fizykochemicznych pożaru w pomieszczeniach o złożonych geometriach. Program oparty wykorzystuje modele polowe, uśrednione równania Naviera-Stokesa, modele turbulencji LES (ang. Large Eddy Simulation -Symulacja Wielkich Wirów) oraz modele obliczeń bezpośrednich DNS (ang. Direct Numerical Simulation). Model LES polega na przestrzennym uśrednieniu pola przepływu. W metodzie tej symulowane są wiry o skali porównywalnej z rozmiarami oczka siatki. Uwzględnienie wirów mniejszych odbywa się przez wprowadzenie dodatkowej lepkości wynikającej z naprężeń w wirach mniejszej skali SGS (ang. Subgrid Scale Stress) niż przyjęta siatka dyskretyzacyjna (skala uśrednienia przestrzennego). Model turbulencji LES stosowany jest w przypadku symulacji większości pożarów. Stała modelu C<sub>s</sub> (stała empiryczna Smagorinskiego) przyjmowana jest jako niezależna od czasu i przestrzeni i jest optymalizowana w zależności od rodzaju analizowanego przepływu. Poza modelem hydrodynamicznym w programie FDS zostały zastosowane również:

- modele spalania w fazie gazowej,
- model pirolizy ciał stałych,
- model promieniowania cieplnego,
- model przewodnictwa cieplnego (przenikania ciepła przez przegrody).

#### 6.1.4. Założenia obliczeń numerycznych

#### Charakterystyka domeny obliczeniowej

Domena obliczeniowa stanowiła jeden obszar obliczeniowy. Przestrzeń domeny zdyskretyzowano za pomocą siatki kartezjańskiej. Wymiary domeny odpowiadają wymiarom autorskiego stanowiska badawczego. Ilość komórek obliczeniowych: około 80.000. Zaproponowana gęstość siatki domeny obliczeniowej została wybrana na podstawie próbnych obliczeń numerycznych oraz kompromisu między dokładnością a szybkością obliczeń.

#### Model turbulencji

Do modelowania turbulentnego przepływu fazy gazowej występującej w środowisku pożaru użyto modelu symulacji wielkich wirów LES zakładając następujące parametry:

- wielkość stałej Smagorinsky'ego jako niezależną od czasu i przestrzeni  $C_s = 0,20$
- liczba Prandtla Pr = 0,7
- liczba Schmidta Sc = 0,5

## Model spalania

Przyjęto model spalania ułamka mieszaniny MFM (ang. Mixture Fraction Model), który jest oparty na założeniu, że spalanie jest kontrolowane przez procesy mieszania paliwa. Model spalania ułamka mieszaniny zakłada, że sadza jest mieszaniną węgla i wodoru, w której ułamkowa liczba atomów wodoru określona jest przez współczynnik stechiometryczny reprezentuje ilość paliwa przetworzonego na sadzę. Lokalna szybkość wydzielania ciepła w czasie spalania jest obliczana na podstawie lokalnej szybkości zużycia tlenu na powierzchni płomienia. Model reakcji: VU Ethanol Pan Fire.

## Model promieniowania

Równanie wymiany ciepła na drodze promieniowania rozwiązywano jedną z metod objętości skończonych FVM (ang. Finite Volume Method).

Wariant 1: Temperatura początkowa, ciśnienie otoczenia, siła i kierunek wiatru:

- temperatura początkowa powietrza w pomieszczeniu +10°C,
- temperatura początkowa powietrza zewnętrznego +10°C,
- ciśnienie otoczenia 1007 hPa,
- wilgotność względna 66%,
- przyciąganie ziemskie 9,81 m/s,
- nie uwzględniono wpływu wiatru.

Wariant 2: Temperatura początkowa, ciśnienie otoczenia, siła i kierunek wiatru:

- temperatura początkowa powietrza w pomieszczeniu +27°C,
- temperatura początkowa powietrza zewnętrznego +27°C,
- ciśnienie otoczenia 1000 hPa,
- wilgotność względna 57%,
- przyciąganie ziemskie 9,81 m/s,
- nie uwzględniono wpływu wiatru.

#### Właściwości materiałów budowlanych

Przyjęto parametry zgodne z danymi producenta płyt gipsowo-kartonowych. Dane znajdują się w załącznikach.

#### Postęp obliczeń

W obliczeniach numerycznych użyto domyślnych ustawień programu FDS dla warunku CFL (ang. Courant-Friedrichs-Lewy) odnoszącego się do zbieżności rozwiązań cząstkowych równań różniczkowych. Krok czasowy δt obliczany jest automatycznie w każdej iteracji.

#### Czas symulacji

Przyjęto, że całkowity czas obliczeń numerycznych w zależności od wariantu będzie trwał od 2 do 3 minut.

#### Parametry pożaru

Podstawowe parametry pożarów badawczych PB1 i PB2 przyjęto zgodnie z ustaleniami rozdziału II.

## Zakres analizy parametrów

Podstawą do oceny funkcjonowania systemu wentylacji oddymiającej oraz systemu mgły wodnej w pomieszczeniu komory badawczej były wykonane symulacje przewidywanego rozkładu temperatury oraz przewidywanego zasięgu widzialności. Jako kryterium oceny przyjęte zostały następujące wartości graniczne dla poszczególnych parametrów:

- temperatura powietrza i gazów pożarowych,
- wartość promieniowanie cieplnego została zweryfikowana na podstawie określenia wartości temperatury,
- zasięg widzialności.

## 6.1.5. Obliczenia numeryczne

#### Sprzęt komputerowy

Całość obliczeń numerycznych przeprowadzono na komputerze klasy PC pracującym w 64bitowym systemie operacyjnym Windows 7 wyposażonym w ośmiowątkowy procesor firmy Intel.

## Charakterystyka domeny obliczeniowej

Domena obliczeniowa stanowiła jeden obszar obliczeniowy. Przestrzeń domeny zdyskretyzowano za pomocą siatki kartezjańskiej. Wymiary domeny odpowiadają wymiarom stanowiska badawczego. Ilość komórek obliczeniowych: około 80.000. Zaproponowana gęstość siatki domeny obliczeniowej została wybrana na podstawie próbnych obliczeń numerycznych oraz kompromisu między dokładnością a szybkością obliczeń. Oznaczenie wykonanego wariantu obliczenia numerycznego i jego podstawowy zakres zamieszczono w poniższej tabeli (tabl. 6.1.). Widoki modelu numerycznego stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 6.2.

Tabl. 6.1. Oznaczenia i zakres wykonanych obliczeń numerycznych dla modelu stanowiska badawczego.

Oznaczenie obliczenia numerycznego	Pożar badawczy	Wariant pracy systemu wentylacji oddymiającej	Wariant pracy systemu mgly wodnej	Zmiany pola parametrów w funkcji czasu	Parametry powietrza i gazów pożarowych w funkcji czasu	
ON1	PB1	-	-	t, φ, w	$T_1, T_2, T_3, T_4, T_{AS}$	
ON2	PB1	SHEVS3	SMW3	t, φ, w	$T_1, T_2, T_3, T_4, T_{AS}$	
ON3	PB2	-	-	t, φ, w	$T_1, T_2, T_3, T_4, T_{AS}$	
ON4	PB2	SHEVS3	SMW3	t, φ, w	$T_1, T_2, T_3, T_4, T_{AS}$	

gdzie:

PB1, PB2 - oznaczenie pożaru badawczego

SHEVS1, SHEVS2 – oznaczenie wariantu pracy systemu wentylacji oddymiającej

SMW1, SMW2 - oznaczenie wariantu pracy systemu mgły wodnej

t – pola zmian temperatury

φ – pola zmian wilgotność względnej

w – pola zmian prędkość powietrza

 $T_1, T_2, T_3, T_4, T_{AS}$  – obliczenia temperatury w miejscach lokalizacji termopar

Załączenie systemu wentylacji oddymiającej i systemu mgły wodnej w każdym wariancie pracy odbywało się po upływie około 20 sekund od momentu zainicjowania pożarów PB1 i PB2.



Rys. 6.2. Widoki modelu numerycznego stanowiska badawczego.

#### 6.1.6. Walidacja modelu

W niniejszym podrozdziale przedstawiono wyniki uproszczonej weryfikacji i walidacji przygotowanego modelu matematycznego autorskiego stanowiska badawczego. Przeprowadzona analiza porównawcza otrzymanych wyników obliczeń numerycznych oraz wyników pomiarów dokonanych na stanowisku badawczym potwierdzała zgodności zmienności przebiegu badanych procesów. Wyniki przeprowadzonych porównań zostały zamieszczone poniżej (rys. 6.3 – 6.6.).



**Rys. 6.3.** Walidacja modelu matematycznego. Wykres przyrostu temperatury w zależności od czasu dla punktów pomiarowych T1 i T2. Badanie B1 i obliczenia ON1 (pożar PB1).



**Rys. 6.4.** Walidacja modelu matematycznego. Wykres przyrostu temperatury w zależności od czasu dla punktów pomiarowych T3 i T4. Badanie B1 i obliczenia ON1 (pożar PB1).



**Rys. 6.5.** Walidacja modelu matematycznego. Wykres przyrostu temperatury w zależności od czasu dla punktów pomiarowych T1 i T2. Badanie B10 i obliczenia ON4 (pożar PB1).



**Rys. 6.6.** Walidacja modelu matematycznego. Wykres przyrostu temperatury w zależności od czasu dla punktów pomiarowych T3 i T4. Badanie B10 i obliczenia ON4 (pożar PB1).

#### 6.1.7. Dodatkowa walidacja modelu

Na poniższych rysunkach (rys. 6.7. - 6.8.) zostały pokazane przykładowe porównania rozkładu pól temperaturowych uzyskane w wyniku pomiarów kamerą termowizyjną na stanowisku badawczym oraz modelów numerycznych opracowanych w programie FDS. Pomiar oraz obliczenia zostały wykonane dla takich samych warunków wyjściowych.



Parametry powietrza zewnętrznego: Temperatura zewnętrzna: 26,3°C Wilgotność: 55%

Parametry przegród: Temperatura maksymalna: 35,2°C Temperatura minimalna: 26,3°C Temperatura średnia: 31,4°C

**Rys. 6.7.** Walidacja modelu matematycznego. Przykładowy termogram przegród stanowiska badawczego po upływie około 60 sekund od momentu zapłonu. Badanie B10 i obliczenia ON4 (pożar PB1).



Ocena efektywności współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej.....

**Rys. 6.8.** Walidacja modelu matematycznego. Obliczeniowy rozkład temperatur na wewnętrznych przegrodach budowlanych po upływie około 60 sekund od momentu zapłonu. Badanie B10 i obliczenia ON4 (pożar PB1).

## 6.2. Analiza wyników obliczeń numerycznych

Przeprowadzona powyżej walidacja modelu matematycznego potwierdziła, że opracowany model matematyczny stosunkowo wiernie replikuje zmiany zachodzące w komorze badawczej w funkcji czasu. Na poniższych rysunkach (rys.6.9. - 6.12) zostały przedstawione przekładowe wyniki obliczeń numerycznych.







**Rys. 6.10.** Obliczeniowy rozkład cząstek dymu i kropel wody w komorach po upływie około 60 sekund od momentu zapłonu. Badanie B10 i obliczenia ON4 (pożar PB1).



**Rys. 6.11.** Obliczeniowy rozkład temperatur w środkowej płaszczyźnie komór po upływie około 20 sekund od momentu zapłonu. Badanie B10 i obliczenia ON4 (pożar PB1).



**Rys. 6.12.** Obliczeniowy rozkład temperatur w środkowej płaszczyźnie komór po upływie około 60 sekund od momentu zapłonu. Badanie B10 i obliczenia ON4 (pożar PB1)

Otrzymane wyniki obliczeń numerycznych potwierdzają wysoką efektywność redukcji temperatury w wyniku współdziałania mechanicznej instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej. W przedziałach czasu, dla których wykonano obliczenia temperatur w punktach pomiarowych wykazują tendencje do znacznego obniżania temperatury w komorze badawczej na skutek zadziałania instalacji mgły wodnej, w stosunku do otrzymanych wyników pomiarów. Występujące różnice mogą wynikać z niedoskonałości metod obliczeniowych, odwzorowania działania dysz mgłowych itp., ale również z niedoskonałości wykonania stanowiska badawczego oraz zainstalowanych na nim urządzeń.

## 6.3. Porównanie otrzymanych wyników

We wcześniejszych rozdziałach zaprezentowano wybrane wykresy porównujące wyniki uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań z wynikami obliczeń numerycznych.

Zastosowanie wizualizacji przepływów powietrza oraz dymów i gazów pożarowych na stanowisku badawczym umożliwiło wstępne wyznaczanie zakresów badanych parametrów. Wizualizacja wyników obliczeń numerycznych takich jak przepływy, rozkłady temperatur itp. przyczyniła się do potwierdzenia określonych wcześniej parametrów i cech charakterystycznych badanych zjawisk.

Analiza porównawcza wyników otrzymanych na autorskim stanowisku badawczym oraz obliczeń numerycznych wykazała, że największą efektywność redukcji temperatur można zaobserwować przy wartościach ilorazu strumienia objętości przepływu mgły wodnej do strumienia objętości powietrza w zakresie od 0,12 · 10<sup>-3</sup> do 0,20 · 10<sup>-3</sup>. Przedmiotowa analiza współdziałania obu instalacji do tej pory nie były prezentowane w dostępnej literaturze.

Jak już wspomniano wcześniej w pewnych przedziałach czasu, dla których wykonano obliczenia numeryczne wartości temperatur w punktach pomiarowych wykazują tendencje do znacznego

obniżania temperatury w komorze badawczej na skutek zadziałania instalacji mgły wodnej, w stosunku do otrzymanych wyników pomiarów.

Oprócz niedoskonałości metod obliczeniowych oraz niedoskonałości wykonania stanowiska badawczego, w tym parametrów zainstalowanych urządzeń należy dodatkowo zauważyć, że wartości mierzonych parametrów cechuje również pewien element przypadkowości związany z charakterem badanych zjawisk. Średnia zgodność otrzymanych rezultatów obliczeń numerycznych z wynikami pomiarów jest na zadowalającym poziomie. Wartość maksymalnej chwilowej rozbieżności wynosi nie więcej niż około 20%.

Z powyżej wymienionych powodów przyjęto, że dalsze rozważania i obliczenia będą prowadzone na podstawie wyników otrzymanych podczas analizy pomiarów wykonanych na stanowisku badawczym.

# 6.4. Odniesienie wyników do rzeczywistej skali geometrycznej

W celu zweryfikowania ustalonych zależności dodatkowo zostały wykonane obliczenia numeryczne dla dwóch wariantów współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej.

Wariant 1

Rodzaj pomieszczenia: archiwum

Wymiary pomieszczenia: długość 14m, szerokość 8m, wysokość 2,8m

Założona całkowita moc pożaru: 2500kW

Założona wysokość warstwy wolnej od dymu: 2,0m

Łączna wydajność obliczeniowa instalacji wentylacji oddymiającej: 39.000 m<sup>3</sup>/h

Średnia obliczeniowa temperatura gorących podstropowych dymów i gazów pożarowych: około 270°C

Łączny strumień objętości mgły wodnej: 114 dm<sup>3</sup>/min

Na poniższych rysunkach (rys. 6.13. - 6.14.) został pokazany model numeryczny pomieszczenia archiwum.



Rys. 6.13. Poglądowy widok wnętrza modelu numerycznego pomieszczenia archiwum.


Rys. 6.14. Poglądowy widok zewnętrzny modelu numerycznego pomieszczenia archiwum.

Wariant 2

Rodzaj pomieszczenia: muzealnej sali wystawowej

Wymiary pomieszczenia: długość 33m, szerokość 33m, wysokość 10m

Przyjęto możliwość wykonania dwóch poziomów

Założona całkowita moc pożaru: 10000 kW

Założona wysokość warstwy wolnej od dymu: 4,0m

Łączna wydajność obliczeniowa instalacji wentylacji oddymiającej: 112.000 m<sup>3</sup>/h

Średnia obliczeniowa temperatura gorących podstropowych dymów i gazów pożarowych: 150°C Łączny strumień objętości mgły wodnej: 320 dm<sup>3</sup>/min

Na poniższych rysunkach (rys. 6.15. i rys. 6.16.) został pokazany model numeryczny pomieszczenia sali wystawowej.

Ocena efektywności współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej.....



Rys. 6.15. Poglądowy widok wnętrza modelu numerycznego pomieszczenia sali wystawowej.



Rys. 6.16. Poglądowy widok zewnętrzny modelu numerycznego pomieszczenia sali wystawowej.

Wstępne obliczenia numeryczne w skali rzeczywistej zostały wykonane przy użyciu programu FDS i wykazały prawidłowość postawionej tezy oraz założeń technicznych określających warunki współdziałania obu instalacji. Analizy obliczeniowych struktur przepływu powietrza i mgły wodnej oraz rozkłady temperatur w newralgicznych płaszczyznach pomieszczeń potwierdziły jakościowe i ilościowe zależności.

Na poniższych rysunkach (rys.6.17. – rys.6.22.) przedstawiono zwizualizowane wybrane wyniki obliczeń numerycznych.



**Rys. 6.17.** Poglądowy widok wyników obliczeń numerycznych dla pomieszczenia archiwum po około 10 sekundach od wybuchu pożaru.

W celu zwizualizowania wyników obliczeń numerycznych przyjęto następujące oznaczenia kolorystyczne:

- 1. kolor czerwony lub czarny frakcje dymów i gazów pożarowych,
- 2. kolor zielony frakcje powietrza kompensującego,
- 3. kolor niebieski frakcje kropel mgły wodnej.



**Rys. 6.18.** Poglądowy widok wyników obliczeń numerycznych dla pomieszczenia archiwum po około 17 sekundach od wybuchu pożaru.



**Rys. 6.19.** Poglądowy widok wyników obliczeń numerycznych dla pomieszczenia archiwum po około 110 sekundach od wybuchu pożaru.



**Rys. 6.20.** Poglądowy widok wyników obliczeń numerycznych dla pomieszczenia archiwum po około 110 sekundach od wybuchu pożaru.



**Rys. 6.21.** Poglądowe obliczeniowe zmiany temperatury powietrza oraz dymów i gazów pożarowych w funkcji czasu w pomieszczeniu archiwum.



**Rys. 6.22.** Poglądowy widok wyników obliczeń numerycznych dla pomieszczenia sali wystawowej po wybuchu pożaru, uruchomieniu instalacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej.

Analiza otrzymanych wyników stwarza dobre podstawy do dalszych badań nad określaniem zasad technicznych efektywnego współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej oraz instalacji mgły wodnej z uwzględnieniem aspektu minimalnych nakładów inwestycyjnych.

## 7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

### 7.1. Wnioski końcowe

W oparciu o przeprowadzone analizy wyników prac badawczych, obliczeń numerycznych oraz rozważań teoretycznych poniżej sformułowano następujące wnioski:

Wnioski ogólne:

- 1. Założone cele i zakres prac badawczych został zrealizowany w całości,
- 2. Analizy wyników przeprowadzonych badań i obliczeń numerycznych potwierdziły prawdziwość tezy.

Wnioski szczegółowe:

- 1. Analiza wyników pomiarów dokonanych na stanowisku badawczym oraz obliczeń numerycznych wykazała, że obliczeniowe strumienie usuwanych dymów i gazów pożarowych wyliczone w celu utrzymania warstwy dymu na określonej wysokości ponad posadzką pomieszczenia, zgodnie z metodologia podaną w wybranych standardach projektowych są większe od wartości pomierzonych na stanowisku badawczym.
- 2. Efektywność redukcji temperatury w wyniku współdziałania mechanicznej instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej w chronionych pomieszczeniach wykazuje zależność wykładniczą i jej wartość zawiera się w granicach od 30 do 50%. Podczas, gdy efektywność redukcji temperatury przez mechaniczną instalację wentylacji oddymiającej zazwyczaj oscyluje w zakresie wartości od 15% do 30%.
- 3. Analiza wyników pomiarów oraz obliczeń numerycznych wykazała, że współdziałanie mechanicznej instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej umożliwia zmniejszenie wydajności instalacji wentylacji oddymiającej o około 45% przy zachowaniu podobnych warunków temperaturowych w strefie ewakuacji ludzi.
- 4. Analiza wyników pomiarów oraz obliczeń numerycznych wykazała, że wzrost stopnia efektywności redukcji temperatury dymów i gazów pożarowych nie wzrasta w miarę wzrostu ilości rozpylonej wody. Największą efektywność redukcji temperatur można zaobserwować przy wartościach ilorazu strumienia masy mgły wodnej do strumienia masy powietrza w zakresie od 0,12·10<sup>-3</sup> do 0,20·10<sup>-3</sup>.
- 5. W oparciu o analizę wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz obliczeń numerycznych można stwierdzić, że krzywa drugiego stopnia poprawnie przedstawia zależność stopnia efektywności redukcji temperatury w funkcji ilorazu strumienia masy mgły wodnej i powietrza kompensującego.
- 6. Analiza przyjętych założeń badawczych oraz wyników pomiarów pozwala stwierdzić, że przedział wartości ilorazu strumienia masy mgły wodnej i powietrza, który w danych warunkach badawczych zapewnia optymalną efektywność redukcji temperatury dymów i gazów pożarowych może ulec zmianie w przypadku pożarów o dużej mocy.
- 7. Współdziałanie mechanicznej instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej przy zachowaniu warunków lokalizacji poszczególnych elementów oraz parametrów technicznych obu instalacji zapewnia zachowanie warunków bezpiecznej ewakuacji ludzi z budynku.

8. Zgodnie z obowiązującymi przepisami [66] spełnienie wymagań w zakresie ochrony przeciwpożarowej w budynkach polega nie tylko na zaprojektowaniu i zainstalowaniu przeciwpożarowych, ale również zapewnieniu urzadzeń ich prawidłowego współdziałania. Przedmiotowe zagadnienie jest szczególnie ważne i istotne w budynkach użyteczności publicznej. Zastosowanie nowych rozwiązań technicznych może zostać oparte o zasady bezpieczeństwa pożarowego i spełnienia określonych celów. Takie podejście pozwala na zoptymalizowanie techniczne i inwestycyjne środków zabezpieczenia przeciwpożarowego w budynku adekwatnych do zidentyfikowanych zagrożeń. Określenie uwarunkowań technicznych współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej w budynkach może zapewnić, w pewnych warunkach, wymagany poziom bezpieczeństwa pożarowego.

## 7.2. Kierunki dalszych badań

Zakres niniejszej pracy doktorskiej nie obejmuje szeregu aspektów związanych z problematyką efektywnego współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej. Omawiane zagadnienia dotyczyły wyłącznie efektywności współdziałania mechanicznej instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej z pominięciem zagadnień związanych ze współdziałaniem grawitacyjnej instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej. Został jednie zasygnalizowany problem wpływu mocy pożaru, temperatur rozpylanej wody i powietrza kompensującego, wielkości kropel rozpylanej mgły wodnej na poprawę efektywności współdziałania obu instalacji. Pominięto również zagadnienia związane z możliwością dystrybucji w pomieszczeniach chronionych instalacją wentylacji oddymiającej mieszanin mgły wodnej i innych środków gaśniczych. Uwzględniając wspomniane powyżej zagadnienia i problemy zwraca się uwagę na fakt, że kierunki badań w przyszłości powinny obejmować:

- 1. badania eksperymentalne oraz obliczenia numeryczne wpływu temperatury, wielkości kropel wody wytwarzanych przez instalację mgły wodnej, warunki ich przenoszenia przez strumień powietrza kompensacyjnego na efektywność obniżania temperatury w chronionej przestrzeni,
- 2. badania eksperymentalne oraz obliczenia numeryczne wpływu rozpylanych przez instalację mgły wodnej mieszanin wody i środków gaśniczych na efektywność obniżania temperatury i skuteczność gaśniczą w chronionej przestrzeni,
- 3. badania eksperymentalne oraz obliczenia numeryczne wpływu rodzaju i parametrów technicznych dysz mgłowych, ich lokalizacji w stosunku do otworów napływu powietrza kompensującego oraz otworów wyciągowych gazów pożarowych na efektywność obniżania temperatury w chronionej przestrzeni,
- 4. badania eksperymentalne oraz obliczenia numeryczne wpływu rodzaju, parametrów technicznych dysz mgłowych i ich lokalizacji w stosunku do otworów napływu powietrza kompensującego w celu zabezpieczenia przed porywaniem dymów i gazów pożarowych wywołanych efektem Venturiego,
- 5. badania powyżej wymienionych zagadnień w skali rzeczywistej.

## 8. LITERATURA

- 1. Ustawa z dnia 24 sierpnia 1991 r. o ochronie przeciwpożarowej. Warszawa: [Dz.U. z 2009 r. Nr 178, poz. 1380 z późn. zm.], 1991.
- Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów. Warszawa: [Dz.U. Nr 109, poz. 719], 2010.
- 3. Kołodziejczyk E. Kwizyn M. Praktyczny poradnik dla specjalisty bhp. Warszawa: Weka-Wiz, 2001.
- 4. PN-EN 12101-2:2005 Systemy kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła; Część 2: Wymagania techniczne dotyczące klap dymowych. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2006.
- 5. Raport techniczny CEN/TS Fixed firefighting systems. Water mist systems. Design and installation: CEN, 2008.
- 6. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Warszawa: [Dz.U. Nr 75 poz. 690, z późn. zm.], 2002.
- 7. ISO/TS 17431:2006, Fire tests Reduced-scale model box test. ISO, 2006. Genewa: ISO, 2006.
- 8. Australia Standards. AS 4391:1999 Smoke management systems Hot smoke test.: Council of Standards Australia, 1999.
- 9. Kleiber A. Brandunfälle Ursachen, Häufigkeit, Folgen. Brandschutz in Altenpflegeheimen Dezember 2003: Kuratorium Deutsche Altershilfe, Hrsg., 2003.
- 10. Gladitz J., i inni. Brandschutz senkt Insolvenrisiko. Brand Aktuell. FVLR, 2003, nr 16.
- 11. Söffker M. Arbeitssicherheit durch vorbeugenden Brandschutz. Düsseldorf: 2010.
- 12. **Stojek M. i Szczechowiak E.** Techniczne środki zabezpieczenia przeciwpożarowego w budynkach. Część 1. Przegląd rozwiązań technicznych. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*. 2012, 43/9.
- 13. Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej . Procedury organizacyjno-techniczne w sprawie spełnienia wymagań w zakresie bezpieczeństwa pożarowego w inny sposób..." 10.2008r. Warszawa: Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej, 2008.
- 14. **Stojek M. i Szczechowiak E.** Techniczne środki zabezpieczenia przeciwpożarowego w budynkach. Część 3. Analiza systemów oddymiających. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*. 2012, 43/11.
- 15. Skiepko E. Instalacje przeciwpożarowe. Warszawa: Dom Wydawniczy Medium, 2009.
- 16. Wiatr J. Oświetlenie awaryjne w budynkach wymagania i zasady zasilania. Warszawa: Dom Wydawniczy Medium, 2009.
- 17. PN-EN 12101-6:2006+AC:2006 Systemy kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła; Część 6: Wymagania techniczne dotyczące systemów ciśnieniowych. Zestawy urządzeń. Warszawa: PKN, 2006.
- 18. PN-B-02877-4:2001/Az1:2006 Instalacje grawitacyjne do odprowadzania dymu i ciepła. Warszawa: PKN, 2001/2006.
- 19. PKN-CEN/TR 12101-4:2006 Systemy kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła; Część 4: Wymagania techniczne dotyczące instalowania wentylacyjnych systemów odprowadzania dymu i ciepła. Warszawa: PKN, 2007.
- 20. Raport techniczny CEN/TR 12101-5:2005 Systemy kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła; Część 5: Wskazówki i rekomendacje funkcjonowania oraz metody obliczeniowe wentylacyjnych systemów odprowadzania dymu i ciepła.: CEN, 2005.
- 21. Głąbski P. i Kosiorek M. Instrukcja nr 378/2002 "Projektowanie instalacji wentylacji pożarowej dróg ewakuacyjnych w budynkach wysokich i wysokościowych. Warszawa: Instytutu Techniki Budowlanej, 2002.
- 22. Mizerski A., Król B. i Sobolewski M. Piany gaśnicze. Warszawa: Szkoła Główna Służby Pożarniczej, 2006.
- 23. PN- EN 1838:2005. Zastosowanie oświetlenia. Oświetlenie awaryjne. Warszawa: PKN, 2005.
- 24. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Pożarnictwa. WP-01:2006. Oświetlenie awaryjne. Warszawa: Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Pożarnictwa, 2006.
- 25. PN-EN 50172:2005. Systemy awaryjnego oświetlenia ewakuacyjnego. Warszawa: PKN, 2005.
- 26. PN-EN 60849:2001 Dźwiękowe systemy ostrzegawcze. Warszawa: PKN, 2001.
- 27. PN-EN 12101-1:2005+A1:2006 Systemy kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła; Część 2: Wymagania techniczne dotyczące kurtyn dymowych. Warszawa: PKN, 2005/2006.
- 28. VdS Schadenverhuetung GmbH. VdS CEA 4001pl:2008-11 Wytyczne VdS-CEA dotyczące instalacji tryskaczowych. Projektowanie i instalowanie. Berlin: VdS Schadenverhuetung GmbH, 2008.
- 29. Stojek M. i Szczechowiak E. Analysis of Cooperation the Pressurisation System with the Water Mist Installation in Buildings. Praga: REHVA Clima 2013, 2013.

- Chołda E., Frankowski W. i Zalewski B. Skrypt inspektora ochrony przeciwpożarowej. Warszawa: Ośrodek Techniki Pożarniczej. Stowarzyszenie Pożarników Polskich, 2009.
- 31. PN-EN ISO 13943:2002 Bezpieczeństwo pożarowe. Terminologia. Warszawa: PKN, 2002.
- 32. Hosser D. Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes.: Technisch-Wissenschaftlicher Beirat, 2009.
- 33. PN-EN 1991-1-2:2006/AC+Ap1 Eurokod 1: Oddziaływanie na konstrukcje. Część 1-2: Oddziaływanie ogólne. Oddziaływanie na konstrukcję w warunkach pożaru. Warszawa: PKN, 2006.
- 34. ISO/TR 13387-2:1999(E) Fire safety engineering. Part 2. Design fire scenarios and design fires. ISO 1999-10-15. Genewa: ISO, 1999.
- 35. Fangrat J. Rozwój pożaru w pomieszczeniu. Kraków: Politechnika Krakowska, 2001.
- 36. Konecki M. Kilka uwag na temat dynamiki & modelowania pożarów. Warszawa: Szkoła Główna Straży Pożarnej, 2010.
- 37. Verein Deutsche Ingenieure. VDI 6019 Engineering methods for the dimensioning of systems for removal of smoke from buildings. Berlin: Verein Deutsche Ingenieure, 2009.
- 38. National Fire Protection Association. *NFPA 204:2007, Standard for smoke and heat venting*. Quincy: National Fire Protection Association, 2007.
- 39. National Fire Protection Association. *NFPA* 92:2012 Standard for smoke control systems. Quincy: National Fire Protection Association, 2012.
- 40. ISO 16735:2006 Fire safety engineering. Requirements governing algebraic equations. Smoke layers. Genewa: ISO, 2006.
- 41. **Praca zespolowa.** *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering.* Quincy: National Fire Protection Association. Society of Fire Protection Engineers, 2002.
- 42. Deutsches Institut für Normung. DIN 18232:2012 Smoke and heat control installations. Part 5: Powered smoke exhaust systems; requirements, design. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2012.
- 43. British Standard Institution. BSI PD 7974 Application of fire safety engineering principles to the design of buildings Part 2: Spread of smoke and toxic gases within and beyond the enclosure of origin. London: British Standard Institution, 2002/2006.
- 44. Mizieliński B. i Kubicki G. Wentylacja pożarowa. Warszawa: WNT Sp. z o.o., 2012.
- 45. Morgan H.P. i Gardner J.P. *Raport 198. Design principles for smoke ventilation in enclosed shopping centres.* Garston: Building Research Establishment, 1990.
- 46. Skaźnik M. Projektowanie systemów usuwania ciepła i dymu oraz ochrona przed zadymieniem. Gdańsk: Mercor. Eko-Poż., 2001.
- 47. Czerwienko D., Roguski J. i Zbrożek P. Roguski J., Zbrożek P., Czerwienko D., Wybrane aspekty stosowania w obiektach budowlanych urządzeń gaśniczych na mgle wodną. Józefów: Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej, 2012.
- 48. Adiga K.C. Droplet breakup energies and formation of ultra-fine mist. Quincy: National Fire Protection Association. NanoMist Systems LLC., 2008.
- 49. VdS Schadenverhütung GmbH. VdS 2815en:2001. Interaction of water extinguishing systems and smoke and heat extractors. Berlin: VdS Schadenverhütung GmbH, 2001.
- 50. Hansell N. i inni. Sprinklers and Vents Interaction. U.K. Fire Research Station. Colt International. *Fire Surveyor*. 21(5), October, 1992.
- 51. Gustafsson N. Smoke Ventilation and Sprinklers A Sprinkler Specialist's View.: Seminar at Fire Research Station, 1992.
- 52. National Fire Protection Association. *NFPA* 13:2007, Standard for the Installation of Sprinkler Systems. Quincy: National Fire Protection Association, 2007.
- 53. Lemaire A.D. i Meeussen V.J.A., *Effects of water mist on real large tunnel fires*. Ultrecht: TNO Efectis Nederland BV, 2008.
- 54. Yoon J. Ko i Hadjisophocleous G. An experimental study of the impact of tunnel suppression on tunnel ventilation. Carleton: Civil and Environmental Engineering. Carleton University, 2010.
- 55. Blanchard E. Computational study of water mist for a tunnel fire application. Nancy: Université Henri Poincaré. Nancy Université, 2011.
- 56. Carvel R., Rein G. i Torero J. Rein G., Carvel R., Torero J., Approximate trajectories of droplets from water mist suppression systems in tunnels. Edinburgh : BRE Centre for Fire Safety Engineering, 2009.
- 57. PIARC. Report PIARC. Road Tunnels: An Assessment of Fixed Fire Fighting Systems.: Report of PIARC Technical Committee C3.3, 2008.
- 58. Cheung W.K. Further studies on water mist and ventilation. Hong Kong: Department of Building Services Engineering. The Hong Kong Polytechnic University, 2004.

- 59. Blanchard E., i inni. Experimental study of smoke/mist interactions in a configuration combining a corridor adjacent to a room: Congrès Français de Mécanique, 2013.
- 60. Hume P. Water Mist Suppression in Conjunction with Displacement Ventilation. Canterbury: Fire Engineering Research Report. University of Canterbury, 2003.
- 61. Quintiere J. Scaling Applications in Fire Research. Fire Safety Journal. 15, 1989.
- 62. Mieczysław Sobczyk. Statystyka. Lublin: Uniwersytet M.Curie-Skłodowskiej, 2006.
- 63. Jeżowiecka-Kabsch K. i Szewczyk H. Jeżowiecka-Kabsch, K., Szewczyk H. Mechanika płynów. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2001.
- 64. Anderson D.A., Pletcher R.H. i Tannehill J.C. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. Philadelphia: Hemisphere Publishing Corporation, 1997.
- 65. McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J, Baum, H., Rehm, R., Mell, W., McDermott, R. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model. Washington: NIST Special Publication, 2010.
- 66. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 roku w sprawie zakresu i formy projektu budowlanego. Warszawa : [Dz.U. Nr 120 poz. 1133, z późn. zm.], 2003.
- 67. Werszko D. Wybrane zagadnienia z techniki cieplnej. Wrocław: Politechnika Wrocławska, 1993.
- 68. Czetweryteński E. i Utrysko B. Hydraulika i hydromechanika. Warszawa: PWN, 1968.

# 9. ZAŁĄCZNIKI

## 9.1. Załącznik 1. Właściwości fizykochemiczne

Tabl. 9.1	Właściwości fizykochemiczne powietrza suchego o temperaturze	10°C (282,2 K) i przy ciśnieniu p=1,013
	$10^{5}[67]$	

Oznaczenie	Wartość	Jednostka	Opis parametru
Т	282,2	К	temperatura
ρ	1,247	kg/m <sup>3</sup>	gęstość powietrza suchego
р	1,013 10 <sup>5</sup>	N/m <sup>2</sup>	ciśnienie
Cp	1,005	kJ/kg·K	ciepło właściwe
λ	$2,51 \ 10^2$	W/m·K	współczynnik przewodzenia ciepła (przewodność)
а	20,0 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup> /s	współczynnik wyrównania temperatury ( $a = \lambda/(\rho \cdot C_p)$ )
η	17,6 10 <sup>6</sup>	kg/s·m	współczynnik lepkości dynamicznej
υ	$14,15\ 10^{6}$	m <sup>2</sup> /s	współczynnik lepkości kinematycznej
Pr	0,705	-	liczba podobieństwa Prandtla

**Tabl. 9.2.** Właściwości fizykochemiczne powietrza suchego o temperaturze 30°C (303,2 K) i przy ciśnieniu p=1,013 10<sup>5</sup> [67]

Oznaczenie	Wartość	Jednostka	Opis parametru
Т	303,2	К	temperatura
ρ	1,165	kg/m <sup>3</sup>	gęstość powietrza suchego
р	1,013 10 <sup>5</sup>	N/m <sup>2</sup>	ciśnienie
Cp	1,005	kJ/kg·K	ciepło właściwe
λ	$2,67 \ 10^2$	W/m·K	współczynnik przewodzenia ciepła (przewodność)
а	22,9 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup> /s	współczynnik wyrównania temperatury ( $a = \lambda/(\rho \cdot C_p)$ )
η	18,6 10 <sup>6</sup>	kg/s·m	współczynnik lepkości dynamicznej
υ	16,0 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup> /s	współczynnik lepkości kinematycznej
Pr	0,701	-	liczba podobieństwa Prandtla

Oznaczenie	Wartość	Jednostka	Opis parametru
Т	372,2	К	temperatura
ρ	0,950	kg/m <sup>3</sup>	gęstość
р	1,013 10 <sup>5</sup>	N/m <sup>2</sup>	ciśnienie
Cp	1,068	kJ/kg·K	ciepło właściwe
λ	$3,13 \ 10^2$	W/m·K	współczynnik przewodzenia ciepła (przewodność)
а	30,8 10 <sup>6</sup>	m <sup>2</sup> /s	współczynnik wyrównania temperatury ( $a = \lambda/(\rho \cdot C_p)$ )
η	20,4 10 <sup>6</sup>	kg/s·m	współczynnik lepkości dynamicznej
υ	$21,54\ 10^6$	m <sup>2</sup> /s	współczynnik lepkości kinematycznej
Pr	0,69	_	liczba podobieństwa Prandtla

**Tabl. 9.3.** Przykładowe właściwości fizykochemiczne spalin o temperaturze 100°C (372,2 K) i przy ciśnieniu $p=1,01325 10^5$  o ilościach:  $n_{CO2}=0,13$ ;  $n_{H2O}=0,11$ ;  $n_{N2}=0,76$  [67]

**Tabl. 9.4.** Właściwości fizykochemiczne wody destylowanej o temperaturze  $10^{\circ}$ C (282,2 K) i przy ciśnieniu<br/> p=0,01227  $10^{-5}$  [68]

Oznaczenie	Wartość	Jednostka	Opis parametru
Т	282,2	К	temperatura
ρ	999,7	kg/m <sup>3</sup>	gęstość cieczy
р	0,01227 10-5	N/m <sup>2</sup>	ciśnienie
Cp	4,193	kJ/kg·K	ciepło właściwe
λ	586 10 <sup>3</sup>	W/m·K	współczynnik przewodzenia ciepła (przewodność)
η	1,3077	mPa·s	współczynnik lepkości dynamicznej
υ	1,3081	mm <sup>2</sup> /s	współczynnik lepkości kinematycznej
β	0,70 10 <sup>4</sup>	1/K	współczynnik rozszerzalności objętościowej
Pr	9,3	-	liczba podobieństwa Prandtla

Oznaczenie	Wartość	Jednostka	Opis parametru
Т	292,2	К	temperatura
ρ	998,3	kg/m <sup>3</sup>	gęstość cieczy
р	0,02336 10-5	N/m <sup>2</sup>	ciśnienie
Cp	4,182	kJ/kg·K	ciepło właściwe
λ	$602 \ 10^3$	W/m·K	współczynnik przewodzenia ciepła (przewodność)
η	1,0050	mPa∙s	współczynnik lepkości dynamicznej
υ	1,0068	mm <sup>2</sup> /s	współczynnik lepkości kinematycznej
β	$1,82 \ 10^4$	1/K	współczynnik rozszerzalności objętościowej
Pr	6,96	-	liczba podobieństwa Prandtla

Tabl. 9.5. Właściwości fizykochemiczne wody destylowanej o temperaturze 20°C (292,2 K) i przy ciśnieniu
p=0,01227 10 <sup>-5</sup> [68]

## 9.2. Załącznik 2. Wyniki badań eksperymentalnych

Tabl. 9.6. Wybrane uśrednione arkusze wyników pomiarów z 22 i 23 maja 2014r.

Pomierzone parametry powietrza na zewnątrz budynku:

- średnia temperatura powietrza zewnętrznego: +28°C,
- średnie ciśnienie: 1000 hPa,
- średnia wilgotność względna: 59%,
- średnia prędkość wiatru: 0,6 m/s.

Oznaczenie badania	Parametry początkowe powietrza				Parametry powietrza i gazów pożarowych							
badania	t <sub>wew</sub>	$\phi_{wew}$	Wwew	Ծ	T <sub>1</sub>	$T_2$	T <sub>3</sub>	$T_4$	T <sub>SP</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	
	[°C]	[%]	[m/s]	[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[ppm]	[%]	
			0,1	30	34,5	44,5	58,7	98,1				
		58		60	40,4	56,7	72,1	110,9				
				90	45,9	62,8	78,1	113,5				
				120	49,2	66,8	81,2	118,2	88,7	12	0,6	
B2	27,5			150	51,2	68,8	88,4	118,0				
				180	52,7	70,8	85,9	116,4				
				210	57,4	73,8	89,2	119,0				
				240	63,1	77,3	91,5	121,7				
				270	-	-	-	-	-	-	-	

gdzie:

 $t_{wew}-temperatury\ powietrza$ 

 $\phi_{wew}$  - wilgotność względna powietrza

 $w_{wew}$  - prędkość powietrza

T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub> - pomiary termoparami

 $T_{\mbox{\scriptsize SP}}$  - pomiar temperatury spalin analizatorem spalin

CO - stężenie tlenku węgla w spalinach

CO2 - stężenie dwutlenku węgla w spalinach

Oznaczenie badania	Param	etry poc powietrz	zątkowe za		Parametry powietrza i gazów pożarowych							
badania	t <sub>wew</sub>	$\phi_{wew}$	Wwew	Շ	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>SP</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	
	[°C]	[%]	[m/s]	[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[ppm]	[%]	
		5 61	0,1	30	32,7	41,4	53,0	76,3				
				60	39,4	45,9	58,3	77,6				
				90	42,4	48,9	64,4	76,6				
				120	42,6	48,2	63,1	78,8	57,3	5	0,4	
B3	27,6			150	42,2	48,7	64,8	78,7				
				180	44,1	50,2	68,9	80.9				
				210	42,6	49,6	69,2	77,4				
				240	42,8	48,7	65,1	73,4				
				270	-	-	-	-	-	-	-	

Oznaczenie badania	Param	etry poc powietrz	zątkowe za		Parametry powietrza i gazów pożarowych							
badania	t <sub>wew</sub>	φ <sub>wew</sub>	Wwew	Ծ	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>SP</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	
	[°C]	[%]	[m/s]	[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[ppm]	[%]	
				30	29,8	42,5	53,4	79,0				
		23 54	0,1	60	36,5	46,3	60,6	77,9				
				90	37,7	46,1	60,7	71,2				
				120	38,1	47,6	61,3	74,4	56,4	4	0,4	
B4	23			150	38,9	48,5	63,5	85,4				
				180	39,7	49,7	64,2	79,7				
				210	39,4	50,1	60,2	78,3				
				240	40,4	49,4	65,8	79,9				
				270	_	-	-	-	-	-	-	

Oznaczenie	Param	etry poc powietrz	zątkowe a	Parametry powietrza i gazów pożarowych							
badania	t <sub>wew</sub>	φ <sub>wew</sub>	Wwew	Ծ	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>SP</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
	[°C]	[%]	[m/s]	[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[ppm]	[%]
			0,1	30	32,1	43,1	53,8	76,3			
		57		60	32,3	42,2	52,9	70,8			
				90	35,9	43,9	58,2	71,4			
				120	37,0	43,4	62,8	72,2	56	6	0,6
В5	26,4			150	37,4	45,2	60,2	74,4			
				180	39,1	45,1	63,5	74,9			
				210	38,7	46,5	63,2	76,2			
				240	39,2	47,0	65,1	76,7			
				270	-	-	-	-	-	-	-

#### Ocena efektywności współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej.....

Oznaczenie badania	Parametry początkowe powietrza			Parametry powietrza i gazów pożarowych							
badania	t <sub>wew</sub>	$\phi_{wew}$	Wwew	Ծ	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>SP</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
	[°C]	[%]	[m/s]	[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[ppm]	[%]
		58		30	30,1	35,2	55,6	77,3			
			0,1	60	30,5	35,9	47,4	67,1			
				90	30,9	35,7	49,4	69,3			
				120	31,5	37,1	52,5	68,8	51,9	7	0,6
B6	26,5			150	32,6	37,4	55,0	71,2			
				180	31,1	36,7	54,5	68,0			
				210	31,8	37,8	54,9	70,3			
				240	32,5	38,6	56,8	71,9			
				270	-	-	-	-	-	-	-

Oznaczenie	znaczenie Parametry początk powietrza		zątkowe :a	Parametry powietrza i gazów pożarowych							
badania	t <sub>wew</sub>	φ <sub>wew</sub>	Wwew	Շ	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>SP</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
	[°C]	[%]	[m/s]	[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[ppm]	[%]
			0,1	30	25,7	34,1	44,8	71,3			
	26	57		60	29,0	35,4	42,8	67,3			
				90	30,5	35,0	41,5	67,0			
				120	30,4	35,6	41,9	67,3	51	6	0,5
B7				150	31,8	36,5	44,9	68,2			
				180	32,0	37,2	46,8	74,2			
				210	32,4	36,6	45,4	72,0			
				240	31,8	36,8	42,7	70,0			
				270	-	-	-	-	-	-	-

Oznaczenie	Parametry początkowe powietrza			Parametry powietrza i gazów pożarowych							
badania	t <sub>wew</sub>	φ <sub>wew</sub>	W <sub>wew</sub>	Շ	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>SP</sub>	СО	CO <sub>2</sub>
	[°C]	[%]	[m/s]	[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[ppm]	[%]
	27	58	0,1	30	28,7	42,0	49,3	81,3			
				60	32,8	39,4	50,7	71,5			
				90	34,5	42,7	57,0	76,8			
				120	35,4	43,2	56,8	73,6	54	7	0,6
B8				150	36,1	43,2	55,9	71,6			
				180	36,9	43,9	57,3	74,5			
				210	36,7	43,1	60,3	73,6			
				240	37,7	45,8	63,3	77,6			
				270							

### Ocena efektywności współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej.....

Oznaczenie	Parametry początkowe powietrza			Parametry powietrza i gazów pożarowych							
badania	t <sub>wew</sub>	$\phi_{wew}$	Wwew	Ծ	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>SP</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
	[°C]	[%]	[m/s]	[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[ppm]	[%]
	28	59	0,1	30	31,4	43,5	51,8	74,7			
				60	31,7	42,8	52,0	75,0			
				90	33,2	44,9	54,1	77,5			
				120	33,4	43,8	53,0	66,9	52,3	4	0,5
В9				150	34,3	43,2	54,8	72,1			
				180	35,1	44,2	55,8	67,2			
				210	34,2	43,6	53,2	68,3			
				240	34,8	44,7	55,4	70,6			
				270	-	-	-	-	-	-	-

Oznaczenie	Parametry początkowe powietrza			Parametry powietrza i gazów pożarowych								
badania	t <sub>wew</sub>	φ <sub>wew</sub>	Wwew	Շ	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	$T_4$	T <sub>SP</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	
	[°C]	[%]	[m/s]	[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[ppm]	[%]	
		58	0,1	30	30,5	38,4	47,5	70,8				
	27			60	30,0	35,8	44,8	62,0				
				90	31,7	36,0	44,8	64,6				
				120	30,7	36,8	47,6	62,8	51,7	6	0,6	
B10				150	30,6	36,0	44,8	65,0				
				180	30,3	36,4	45,2	71,0				
				210	27,8	35,2	47,1	72,6				
				240	29,9	36,6	48,9	65,3				
				270	-	-	-	-	-	-	-	

Oznaczenie	Parametry początkowe powietrza			Parametry powietrza i gazów pożarowych								
badania	t <sub>wew</sub>	$\phi_{wew}$	Wwew	Շ	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>SP</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	
	[°C]	[%]	[m/s]	[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[ppm]	[%]	
	27	57	0,01	30	28,1	33,2	42,3	60,5	-	-	-	
				60	28,2	29,2	34,1	39,1	-	-	-	
				90	29,1	31,2	34,2	40,4	-	-	-	
				120	30,3	31,3	35,3	43,3	-	-	-	
ON4				150	31,1	33,5	36,1	45,2	-	-	-	
				180	32,4	34,2	37,3	47,2	-	-	-	
				210	-	-	-	-	-	-		
				240	-	-	-	-	-	-		
				270	-	-	-	-	-	-	-	



Rys. 9.1. Przykładowe wyniki obliczeń numerycznych – pomiar temperatur.

#### 9.3. Załącznik 3. Przykładowa kopia pliku obliczeń numerycznych

POZAR\_PB2\_SHEVS140\_WM.fds 2014-06-20 14:35:08

```
&HEAD CHID='POZAR PB2 SHEVS140 WM', TITLE='Room fire'/
&TIME T END=120.0/
&DUMP RENDER FILE='POZAR PB2 10kW SHEVS140 WM04 2.ge1'/
&MISC GROUND LEVEL=0.5, HUMIDITY=57.0, LAPSE RATE=0.1, P INF=1.0E5, TMPA=27.0,
U0=0.1, V0=0.1, W0=0.1, BAROCLINIC=.FALSE./
&RADI RADIATIVE FRACTION=0.33/
&MESH ID='MESH', FYI='DOKTORAT STANOWISKO BAD', IJK=30,74,36,
XB=0.0.0.86,0.0,2.14,0.0,1.02/
&PART ID='Tracer',
  MASSLESS=.TRUE.,
  COLOR='BLACK',
  AGE=60.0/
&PART ID='Water',
  WATER=.TRUE.,
  AGE=60.0,
  RGB=0,51,255,
  DIAMETER=50.0,
  MAXIMUM DIAMETER=200.0.
  SPECIFIC HEAT=4.184,
  MELTING TEMPERATURE=0.0,
  VAPORIZATION TEMPERATURE=100.0,
  HEAT OF VAPORIZATION=2259.0/
&PROP ID='Water Spray',
  PART ID='Water'.
  DT INSERT=0.05,
  DROPLETS PER SECOND=10000.
  FLOW RATE=0.4083,
  ORIFICE DIAMETER=4.1E-4,
  SPRAY ANGLE=56.0,60.0/
&DEVC ID='THCP01', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.43,1.36,0.2/
&DEVC ID='THCP02', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.43,1.36,0.4/
&DEVC ID='THCP03', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.43,1.36,0.6/
&DEVC ID='THCP04', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.43,1.36,0.8/
&DEVC ID='THCP Anlizator', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.43,1.36,0.95/
&DEVC ID='ZRASZACZ', PROP ID='Water Spray', XYZ=0.43,0.43,0.72, QUANTITY='TIME',
SETPOINT=20.0/
&DEVC ID='CZAS', OUANTITY='TIME', XYZ=0.0,0.0,0.0, SETPOINT=20.0/
&MATL ID='GYPSUM',
  FYI='NBSIR 88-3752 - ATF NIST Multi-Floor Validation',
  SPECIFIC HEAT=1.09,
  CONDUCTIVITY=0.17,
  DENSITY=930.0/
&SURF ID='Wentylacja wywiew',
  RGB=255.51.153.
  VOLUME FLUX=0.0195/
&SURF ID='Wentylacja nawiew',
```

```
RGB=51,255,0,
   VOLUME FLUX=-0.039/
&SURF ID='Gypsum',
   COLOR='GRAY 70',
   MATL ID(1,1)='GYPSUM',
   MATL MASS FRACTION(1,1)=1.0,
   THICKNESS(1)=0.013/
&SURF ID='Burner',
   COLOR='RED',
   HRRPUA=377.0,
   PART ID='Tracer'/
&OBST XB=0.315,0.545,1.65027,1.85027,0.0,0.1, SURF ID='Gypsum'/ Pad
&OBST XB=0.0,0.86,0.44,0.45,0.0,1.02, SURF ID='Gypsum'/ Sciana1
&OBST XB=0.0,0.86,0.44,2.14,0.84,0.85, SURF ID='Gypsum'/ Sufit1
&OBST XB=0.0,0.86,2.13,2.14,0.0,1.02, SURF ID='Gypsum'/ Sciana2
&OBST XB=0.0,0.01,0.0,2.14,0.0,1.02, SURF ID='Gypsum'/ Sciana3
&OBST XB=0.0,0.86,0.0,0.01,0.0,1.02, SURF ID='Gypsum'/ Sciana4
&OBST XB=0.85,0.86,0.0,2.14,0.0,1.02, SURF ID='Gypsum'/ Okno
&HOLE XB=0.268,0.568,0.420816,0.460816,6.66134E-16,0.67/ Door
&HOLE XB=0.33,0.53,0.96216,1.06216,0.82,0.86/ Wywiewnik1
&HOLE XB=0.33,0.53,1.51162,1.61162,0.82,0.86/ Wywiewnik2
&VENT SURF ID='Wentylacja wywiew', XB=0.366,0.494,1.00501,1.12501,1.02,1.02,
DEVC ID='CZAS'/ WYWIEW1
&VENT SURF ID='Wentylacja nawiew', XB=0.366,0.494,0.156,0.28,1.02,1.02, DEVC ID='CZAS'/
NAWIEW
&VENT SURF ID='Wentylacja wywiew', XB=0.366,0.494,1.53962,1.65962,1.02,1.02,
DEVC ID='CZAS'/ WYWIEW2
&VENT SURF ID='Burner', XB=0.34,0.52,1.68,1.82,0.1,0.1/Burner
&VENT SURF ID='Gypsum', XB=0.0,0.86,0.0,2.14,0.0,0.0/ Floor
&VENT SURF ID='Gypsum', XB=0.0,0.86,0.0,2.14,1.02,1.02/ SUFIT2
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.43/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE ZONE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.43/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.43/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=0.43/
```

&TAIL /

&SLCF QUANTITY='RELATIVE HUMIDITY', PBX=0.43/ &SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=0.4/

## 9.4. Załącznik 4. Parametry płyt gipsowo-kartonowych

Poniżej zostały podane podstawowe informacje dotyczące zastosowanych przy budowie stanowiska badawczego ognioodpornych płyt gipsowo-kartonowych.

#### 1. Nazwa wyrobu:

ognioodporna płyta gipsowo-kartonowa typu DF

#### 2. Nazwa producenta:

Knauf Bełchatów Sp. z o.o. Fabryka w Brzeziu k. Opola ul. Norweska 1 PL-46-081 Dobrzeń Wielki

#### 3. Właściwości użytkowe

Zadeklarowane przez producenta właściwości użytkowe ognioodpornych płyt gipsowokartonowych typu DF:

Zasadnicze charakterystyki	Właściwości użytkowe	Zharmonizowana specyfikacja techniczna
Reakcja na ogień	A2-s1,d0	EN 13501-1:2007+A1:2009
Wytrzymałość na zginanie	Spełnia wymagania	EN 520:2004+A1:2009
Współczynnik oporu dyfuzyjnego [µ]	10	EN 12524:2000
Współczynnik przewodzenia ciepła [λ]	0,25 W/(m·K)	EN 12524:2000
Wytrzymałość na ścinanie na łącznik	NPD	EN 520:2004+A1:2009
Odporność na uderzenia	Określona dla systemów wg literatury <u>www.norgips.pl</u>	EN 520:2004+A1:2009
Właściwości akustyczne	Określone dla systemów wg literatury <u>www.norgips.pl</u>	EN 520:2004+A1:2009