



Autoreferat

wynikający z art. 13 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789)

mgr inż. Piotr Kaczmarzyk

Tytuł rozprawy doktorskiej:

Badania i modelowanie procesów techniczno-użytkowych
mobilnych wentylatorów nadciśnieniowych wykorzystywanych
w akcjach ratunkowo-gaśniczych na potrzeby jednostek
ochrony przeciwpożarowej

Promotor:
prof. dr hab. inż. Piotr Krawiec

Promotor pomocniczy:
st. bryg. dr inż. Paweł Janik

Poznań, 26 września 2024

Spis treści:

1.	Dane osobowe.....	4
2.	Posiadane dyplomy, stopnie zawodowe, odbyte szkolenia.....	4
2.1.	Tytuły zawodowe.....	4
2.2.	Odbyte szkolenia.....	5
3.	Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	5
4.	Osiągnięcia naukowe wchodzące w skład dysertacji.....	5
4.1.	Tytuł rozprawy doktorskiej.....	5
4.2.	Zestawienie publikacji naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej.....	6
4.3.	Streszczenia w językach polskim oraz angielskim	9
5.	Wprowadzenie i uzasadnienie podjętej tematyki [A1-A2, A12]	11
6.	Określenie celu badawczego oraz zadań badawczych.....	15
7.	Metodologia badań i modelowania wykorzystana do wykonania zadań wpisanych w obszar planu badawczego	17
7.1.	Badania eksperymentalne stosowane do pomiaru parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne wykorzystywane w akcjach ratowniczo-gaśniczych [A6,A8]	17
7.2.	Badania eksperymentalne z zastosowaniem trzech metod oceny parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne (metody A, B i C)	25
7.2.1.	Badania parametrów przepływu zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5801 (metoda A) [A3]	27
7.2.2.	Badania charakterystyk profilu prędkości przepływu strugi powietrza – wolny przepływ (metoda B) [A5, A11]	30
7.2.3.	Badania parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne w rzeczywistych warunkach pracy – testy na terenie wielokondygnacyjnego obiektu budowlanego (metoda C) [A7, A9 - A10].....	45
8.	Porównanie metod badawczych i ich ograniczenia [A1, A3, A8]	57
8.1.	Analiza porównawcza parametrów przepływu uzyskiwanych w wyniku badań z użyciem metod A, B i C	57
8.2.	Analiza porównawcza parametrów pracy jednostek napędowych podczas badań z użyciem metod A, B i C.	61
8.3.	Analiza porównawcza emisji gazów spalinowych przez jednostki napędowe wentylatorów mobilnych podczas badań z użyciem metod A, B i C	65
9.	Hybrydowa metoda oceny parametrów przepływu w badaniach eksperymentalnych – metod A, B i C [A13]	73

10.	Symulacje CFD metod badawczych pomiaru parametrów przepływu w ramach hybrydowej metody pomiaru [A4, A13].....	78
10.1.	Symulacja CFD metody badawczej A – test PN-EN ISO 5801	79
10.2.	Symulacja CFD metody badawczej B – badanie charakterystyk profilu prędkości strugi powietrza w wolnym przepływie	82
10.3.	Symulacja CFD metody badawczej C – badania parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne w rzeczywistych warunkach pracy – testy na terenie wielokondygnacyjnego obiektu budowlanego [A13]	87
11.	Walidacja modeli numerycznych dla badań parametrów przepływu (metody A, B i C).....	95
12.	Propozycje rozwoju metod badawczych – testy wentylatorów pracujących w tandemie [A14].....	101
13.	Podsumowanie.....	110
14.	Literatura	113
15.	Syntetyczne ujęcie wkładu w rozwój dyscypliny naukowej – inżynieria mechaniczna	118
16.	Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	119
16.1.	Otrzymane nagrody	119
16.2.	Projekty i wewnętrzne prace badawcze.....	119
17.	Zbiorcze zestawienie osiągnięć naukowo-badawczych	121

1. Dane osobowe

mgr inż. Piotr Kaczmarzyk

Aktualne miejsce zatrudnienia oraz stanowisko:

Centrum Naukowo Badawcze Ochrony Przeciwpowodzi – Państwowy Instytut Badawczy
Zespół Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości – BW
ul. Nadwiślańska 213, 05-420 Józefów

Stanowisko: Główny specjalista badawczo-techniczny.

Obszary zainteresowań naukowych:

- Badania parametrów techniczno-użytkowych urządzeń stosowanych w ochronie przeciwpożarowej;
- Analizy numeryczne dot. oceny skuteczności działania urządzeń oddymiających i zapobiegających zadymieniu;
- Badanie ogniowe materiałów budowlanych, w tym materiałów wyposażenia wnętrz i kabli a także ścian elewacyjnych i dachów,
- Badania parametrów wybuchowości gazów, pyłów i par cieczy.

2. Posiadane dyplomy, stopnie zawodowe, odbyte szkolenia

2.1. Tytuły zawodowe

2015 – inżynier

Akademia Pożarnicza (dawniej Szkoła Główna Służby Pożarniczej), Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego, kierunek: Inżynieria Bezpieczeństwo Pożarowego.

Tytuł pracy inżynierskiej: Analiza zagrożeń podczas wybuchu BLEVE zbiorników zawierających skroplone gazy

Promotor: dr hab. inż. Zdzisław Salomonowicz

2015 – studia podyplomowe

Wyższa Szkoła Biznesu i Nauk o Zdrowiu, kierunek: Bezpieczeństwo i Higiena pracy

2017 – magister

Akademia Pożarnicza (dawniej Szkoła Główna Służby Pożarniczej), Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego, kierunek: Inżynieria Bezpieczeństwo Pożarowego.

Tytuł pracy inżynierskiej: Analiza czynników mających wpływ na szybkość propagacji strefy spalania wybranych gazów i par cieczy

Promotor: dr hab. inż. Zdzisław Salomonowicz

2020 – studia podyplomowe

Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, kierunek: Systemy oddymiania budynków – wentylacja pożarowa

Tytuł pracy: Badania wybranych parametrów techniczno-użytkowych mobilnych wentylatorów, stosowanych przez jednostki ochrony przeciwpożarowej

2.2. Odbyte szkolenia

Kopie certyfikatów i zaświadczeń ukończenia szkolenia zamieszczono w załączniku nr 1.

2017 – Szkolenie pt. Modelowanie 3D w programie Fusion 360 – ABCAD

2017 – Szkolenie pt. Rysunek 2D w programie Autocad – ABCAD

2019 – Szkolenie pt. Modelowanie parametrów pożarowych w programie Pyrosim - STIGO

2021 – Szkolenie pt. Modelowanie parametrów przepływowych w programie Ansys Fluent – Symkom

2022 – Szkolenie pt. Kłapy przeciwpożarowe w instalacjach wentylacji – CNBOP-PIB

2023 – Szkolenie pt. Systemy zarządzania w jednostce certyfikującej wyroby według PN-EN ISO-IEC 17065:2013-03 – Polskie Centrum Akredytacji

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Główny specjalista badawczo-techniczny	Zespół Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości – Centrum Naukowo Badawcze Ochrony Przeciwpowazarowej Państwowy Instytut Badawczy	2023/11 – obecnie
Starszy specjalista badawczo-techniczny	Zespół Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości – Centrum Naukowo Badawcze Ochrony Przeciwpowazarowej Państwowy Instytut Badawczy	2022/09 – 2023/11
Starszy specjalista inżynieryjno-techniczny	Zespół Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości – Centrum Naukowo Badawcze Ochrony Przeciwpowazarowej Państwowy Instytut Badawczy	2019/07 – 2022/09
Specjalista inżynieryjno-techniczny	Zespół Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości – Centrum Naukowo Badawcze Ochrony Przeciwpowazarowej Państwowy Instytut Badawczy	2017/07 – 2019/07
Młodszy specjalista inżynieryjno-techniczny	Zespół Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości – Centrum Naukowo Badawcze Ochrony Przeciwpowazarowej Państwowy Instytut Badawczy	2015/06 – 2017/07

4. Osiągnięcia naukowe wchodzące w skład dysertacji

4.1. Tytuł rozprawy doktorskiej

Tytułem rozprawy doktorskiej wynikającej z art. 13 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789) jest:

Badania i modelowanie procesów techniczno-użytkowych mobilnych wentylatorów nadciśnieniowych wykorzystywanych w akcjach ratunkowo-gaśniczych na potrzeby jednostek ochrony przeciwpożarowej

Na rozprawę doktorską składa się 13 wybranych publikacji, wyszczególnionych na liście czasopism naukowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

4.2. Zestawienie publikacji naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej

A1	Kaczmarzyk, P. , Klapsa, W., Janik, P., & Krawiec, P. (2021). Identification and evaluation of technical and operational parameters of mobile positive pressure ventilation fans used during rescue operations. Safety and Fire Technology, 58(2).	Punktacja MNiSW: 40	Imapact factor: -
Byłem twórcą hipotezy badawczej i pomysłodawcą badań. Do moich zadań należało opracowanie metodyki badawczej i przygotowanie artykułu. Brałem czynny udział w realizacji eksperymentów badawczych przedstawionych w publikacji. Wykonywałem analizę matematyczną wykorzystanych w pracy eksperymentów. Przeprowadziłem analizę wyników oraz je podsumowałem. Mój udział procentowy wyniósł: 25%			
A2	Kaczmarzyk, P. , Janik, P., Klapsa, W., & Bugaj, G. (2022). Possibilities of using mobile fans and the parameters conditioning the effectiveness of tactical mechanical ventilation. Safety & Fire Technology, 59(1), 58-82.	Punktacja MNiSW: 40	Imapact factor: -
Byłem twórcą hipotezy badawczej i pomysłodawcą badań. Do moich zadań należało opracowanie metodyki badawczej i przygotowanie artykułu. Brałem czynny udział w realizacji eksperymentów badawczych przedstawionych w publikacji. Wykonywałem analizę matematyczną wykorzystanych w pracy eksperymentów. Przeprowadziłem analizę wyników oraz je podsumowałem. Mój udział procentowy wyniósł: 30%			
A3	Kaczmarzyk, P. , Warguła, Ł., Janik, P., & Krawiec, P. (2022). Influence of measurement methodologies for the volumetric air flow rate of mobile positive pressure fans on drive unit performance. Energies, 15(11), 3953.	Punktacja MNiSW: 140	Imapact factor: 3
Byłem twórcą hipotezy badawczej i pomysłodawcą badań. Do moich zadań należało opracowanie metodyki badawczej i przygotowanie artykułu. Brałem czynny udział w realizacji eksperymentów badawczych przedstawionych w publikacji. Wykonywałem analizę matematyczną wykorzystanych w pracy eksperymentów. Przeprowadziłem analizę wyników oraz je podsumowałem. Mój udział procentowy wyniósł: 40%			
A4	Kaczmarzyk, P. , Małozieć, D., Warguła, Ł., & Krawiec, P. (2022). Comparative Analysis of Tests under Real Conditions and CFD Model for Selected Operation Parameters of a Mobile Fan Used by Fire Protection Units. In MATEC Web of Conferences (Vol. 357, p. 02011). EDP Sciences.	Punktacja MNiSW: 5	Imapact factor: -
Byłem twórcą hipotezy badawczej i pomysłodawcą badań. Do moich zadań należało opracowanie metodyki badawczej i przygotowanie artykułu. Brałem czynny udział w realizacji eksperymentów badawczych przedstawionych w publikacji. Wykonywałem analizę matematyczną wykorzystanych w pracy eksperymentów. Przeprowadziłem analizę wyników oraz je podsumowałem. Mój udział procentowy wyniósł: 55%			
A5	Kaczmarzyk, P. , Janik, P., Krawiec, P., Klapsa, W., & Noske, R. (2022). Measurement of air stream velocity profiles, generated by fire protection units mobile fans. J. Int. Sci. Publ. Ecol. Saf, 16, 42-50.	Punktacja MNiSW: 5	Imapact factor: -
Byłem twórcą hipotezy badawczej i pomysłodawcą badań. Do moich zadań należało opracowanie metodyki badawczej i przygotowanie artykułu. Brałem czynny udział			

w realizacji eksperymentów badawczych przedstawionych w publikacji. Wykonywałem analizę matematyczną wykorzystanych w pracy eksperymentów. Przeprowadziłem analizę wyników oraz je podsumowałem. Mój udział procentowy wyniósł: 45%			
A6	Warguła, Ł., & Kaczmarzyk, P. (2022). Legal regulations of restrictions of air pollution made by mobile positive pressure fans—the case study for Europe: A review. <i>Energies</i>, 15(20), 7672.	Punktacja MNiSW: 140	Imapact factor: 3
Byłem twórcą hipotezy badawczej i pomysłodawcą badań. Do moich zadań należało opracowanie metodyki badawczej i przygotowanie artykułu. Brałem czynny udział w realizacji eksperymentów badawczych przedstawionych w publikacji. Wykonywałem analizę matematyczną wykorzystanych w pracy eksperymentów. Przeprowadziłem analizę wyników oraz je podsumowałem. Mój udział procentowy wyniósł: 50%			
A7	Kaczmarzyk, P., Noske, R., Janik, P., & Krawiec, P. (2022). Experimental Study of Flow Characteristics of Mobile Fans under Real Operating Conditions (Case Study). <i>Safety & Fire Technology</i>, 60.	Punktacja MNiSW: 40	Imapact factor: -
Byłem twórcą hipotezy badawczej i pomysłodawcą badań. Do moich zadań należało opracowanie metodyki badawczej i przygotowanie artykułu. Brałem czynny udział w realizacji eksperymentów badawczych przedstawionych w publikacji. Wykonywałem analizę matematyczną wykorzystanych w pracy eksperymentów. Przeprowadziłem analizę wyników oraz je podsumowałem. Mój udział procentowy wyniósł: 50%			
A8	Warguła, Ł., Kaczmarzyk, P., Lijewski, P., Fuć, P., Markiewicz, F., Małozieć, D., & Wiczorek, B. (2023). Effect of the volumetric flow rate measurement methodology of positive pressure ventilators on the parameters of the drive unit. <i>Energies</i>, 16(11), 4515.	Punktacja MNiSW: 140	Imapact factor: 3
Byłem twórcą hipotezy badawczej i pomysłodawcą badań. Do moich zadań należało opracowanie metodyki badawczej i przygotowanie artykułu. Brałem czynny udział w realizacji eksperymentów badawczych przedstawionych w publikacji. Przeprowadziłem analizę wyników oraz je podsumowałem. Mój udział procentowy wyniósł: 25%			
A9	Kaczmarzyk, P., Janik, P., Małozieć, D., Klapsa, W., & Warguła, Ł. (2023). Experimental studies of the impact of the geometric dimensions of the outlet opening on the effectiveness of positive pressure ventilation in a multi-storey building—flow characteristics. <i>Applied Sciences</i>, 13(9), 5714.	Punktacja MNiSW: 100	Imapact factor: 2,5
Byłem twórcą hipotezy badawczej i pomysłodawcą badań. Do moich zadań należało opracowanie metodyki badawczej i przygotowanie artykułu. Brałem czynny udział w realizacji eksperymentów badawczych przedstawionych w publikacji. Wykonywałem analizę matematyczną wykorzystanych w pracy eksperymentów. Przeprowadziłem analizę wyników oraz je podsumowałem. Mój udział procentowy wyniósł: 50%			
A10	Kaczmarzyk, P., Warguła, Ł., Krawiec, P., Janik, P., Noske, R., & Klapsa, W. (2023). Influence of the positive pressure ventilator setting distance in front of the doorway on the effectiveness of tactical mechanical ventilation in a multistory building. <i>Applied Sciences</i>, 13(9), 5536.	Punktacja MNiSW: 100	Imapact factor: 2,5
Byłem twórcą hipotezy badawczej i pomysłodawcą badań. Do moich zadań należało opracowanie metodyki badawczej i przygotowanie artykułu. Brałem czynny udział w realizacji eksperymentów badawczych przedstawionych w publikacji. Wykonywałem analizę matematyczną wykorzystanych w pracy eksperymentów. Przeprowadziłem analizę wyników oraz je podsumowałem. Mój udział procentowy wyniósł: 45%			

A11	Kaczmarzyk, P. , Warguła, Ł., & Janik, P. (2023). Experimental studies of the influence of mobile fan positioning parameters on the ability to transport the air stream into the door opening. Scientific Reports, 13(1), 14976.	Punktacja MNIŚW: 140	Impact factor: 3,8
<i>Byłem twórcą hipotezy badawczej i pomysłodawcą badań. Do moich zadań należało opracowanie metodyki badawczej i przygotowanie artykułu. Brałem czynny udział w realizacji eksperymentów badawczych przedstawionych w publikacji. Wykonywałem analizę matematyczną wykorzystanych w pracy eksperymentów. Przeprowadziłem analizę wyników oraz je podsumowałem.</i> Mój udział procentowy wyniósł: 50%			
A12	Kaczmarzyk, P. , Warguła, Ł., Janik, P., Krawiec, P., Bąk, D., & Klapsa, W. (2024). Problems of operation of positive pressure ventilators on the basis of surveys of Polish officers of the State Fire Service. Scientific Reports, 14(1), 10795.	Punktacja MNIŚW: 140	Impact factor: 3,8
<i>Byłem twórcą hipotezy badawczej i pomysłodawcą badań. Do moich zadań należało opracowanie metodyki badawczej i przygotowanie artykułu. Brałem czynny udział w realizacji eksperymentów badawczych przedstawionych w publikacji. Wykonywałem analizę matematyczną wykorzystanych w pracy eksperymentów. Przeprowadziłem analizę wyników oraz je podsumowałem.</i> Mój udział procentowy wyniósł: 45%			
A13	Kaczmarzyk, P. , Małozieć, D., Burdzy, T., Ziegler, B., Krawiec, P., Dziechciarz, A., & Warguła, Ł. (2024). Analysis of the air stream flow parameters generated by the positive pressure ventilator—Full scale experiment and CFD simulation. Scientific Reports, 14(1), 6852.	Punktacja MNIŚW: 140	Impact factor: 3,8
<i>Byłem twórcą hipotezy badawczej i pomysłodawcą badań. Do moich zadań należało opracowanie metodyki badawczej i przygotowanie artykułu. Brałem czynny udział w realizacji eksperymentów badawczych oraz symulacji numerycznych CFD przedstawionych w publikacji. Wykonywałem analizę matematyczną wykorzystanych w pracy eksperymentów. Przeprowadziłem analizę wyników oraz je podsumowałem.</i> Mój udział procentowy wyniósł: 45%			
A14	Kaczmarzyk, P. , Noske, R., Bąk, D., Krawiec, P., Ziegler, B., & Warguła, Ł. (2024). Positive pressure ventilator of a conventional type working in sets—analysis of the effectiveness of positioning methods.	Na dzień składania rozprawy artykuł ma status „w recenzji”	
<i>Artykuł jest w trakcie recenzji w czasopiśmie Scientific Reports, wydawnictwa Springer Nature (140 pkt MNIŚW, IF 3,8).</i>			

Pełne teksty publikacji wraz z oświadczeniami autorów zamieszczono w załączniku nr 2.

4.3. Streszczenia w językach polskim oraz angielskim

Streszczenie

Tematyka rozprawy związana jest z oceną parametrów techniczno-użytkowych wentylatorów mobilnych wykorzystywanych przez jednostki ochrony przeciwpożarowej do działań ratowniczych. W ramach niniejszej pracy została opracowana hybrydowa metoda oceny parametrów przepływu strugi powietrza wytwarzanej przez wentylator mobilny ukierunkowana na ocenę jego efektywności, czego miarą są uzyskiwane parametry przepływu (objętościowe natężenie przepływu i ciśnienie). Opracowana metoda (oparta na badaniu w małej skali oraz wykorzystaniu narzędzi CFD) pozwala na weryfikację parametrów przepływu dla trzech stosowanych wielkoskalowych metod badania wentylatorów (test wg PN-EN ISO 5801 – metoda A, badanie charakterystyk profilu prędkości w wolnym przepływie – test opracowany przez National Institute of Standards and Technology – metoda B, badania parametrów przepływu w rzeczywistym obiekcie budowlanym – metoda C). Poprawność opracowanej metody została potwierdzona w wyniku procesu walidacji. W ramach niniejszego opracowania wykonano analizę porównawczą metod stosowanych do oceny parametrów przepływu strumienia powietrza wytwarzanego przez wentylatory mobilne. Zakres rozprawy obejmuje również wskazanie parametrów pozycjonowania wentylatorów mobilnych różnego typu (pracujących indywidualnie i w tandemie) charakteryzujących się największą efektywnością w rzeczywistych warunkach pracy (wolny przepływ). Ponadto wykonano również badania ukierunkowane na rozwój metod testowania wentylatorów pracujących w tandemie. Wykonane prace pozwoliły na określenie krytycznych parametrów od których zależy skuteczność stosowania wentylatorów w trakcie działań ratowniczych i na wykrycie zjawisk przepływowych negatywnie wpływających na proces wentylacji.

Dissertation title:

Research and modeling of technical and operational processes of positive pressure ventilators using in rescue and firefighting operations for the needs of fire protection units

Abstract

The subject of the dissertation is related to the assessment of technical and operational parameters of ventilators used by fire protection units for rescue operations. As part of this work, a hybrid method for assessing the parameters of the air flow generated by a mobile ventilator was developed, focused on assessing its efficiency, which is measured by the generated flow parameters (volume flow rate and pressure). The developed method (based on a small-scale study and the use of CFD tools) allows for the verification of flow parameters for three large-scale ventilator testing methods (test according to PN-EN ISO 5801 - method A, testing of the characteristics of the velocity profile in free flow - test developed by the National Institute of Standards and Technology - method B, testing of flow parameters in a real building - method C). The correctness of the developed method was confirmed as a result of the validation process. As part of this study, a comparative analysis of the methods used to assess the parameters of the air flow generated by mobile ventilator was performed. The scope of the dissertation also includes indicating the parameters of positioning of mobile ventilator of various types (working individually and in tandem) characterized by the highest efficiency in real working conditions (free flow). In addition, research was also carried out aimed at developing testing methods for ventilators working in tandem. The work performed allowed for determining the critical parameters on which the effectiveness of using ventilators during rescue operations depends and for detecting flow phenomena that negatively affect the ventilation process.

5. Wprowadzenie i uzasadnienie podjętej tematyki [A1-A2, A12]

Wentylatory mobilne stanowią ważne narzędzie wykorzystywane przez jednostki ochrony przeciwpożarowej podczas działań ratowniczych. Są stosowane m.in. w ramach następujących technik:

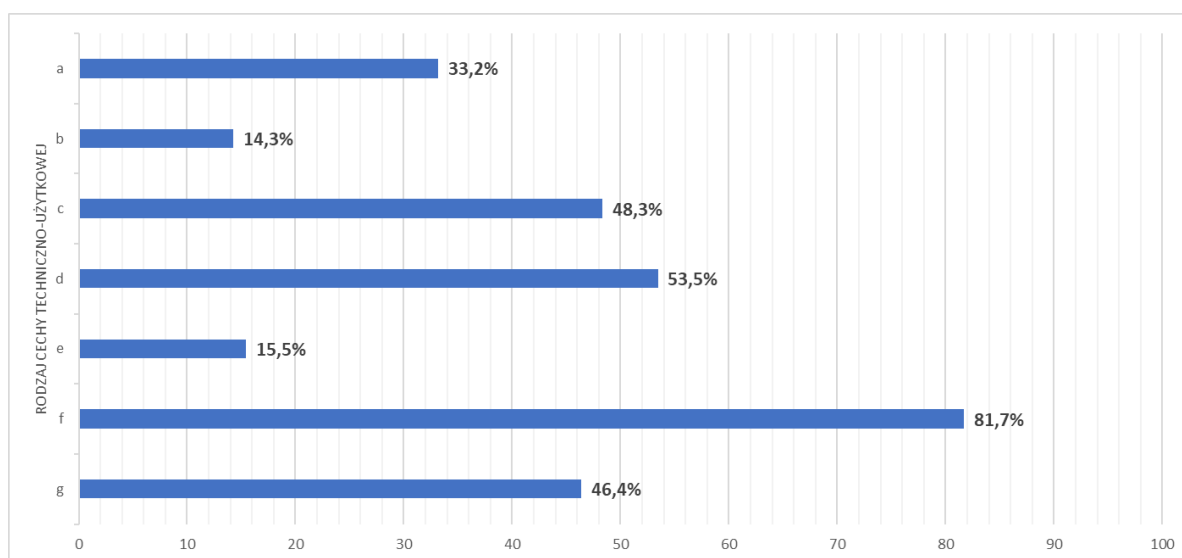
- wentylacja nadciśnieniowa (ang. *positive pressure ventilation*) – technika polegająca na wtłoczeniu powietrza przez otwór wlotowy obiektu budowlanego z wykorzystaniem wentylatora mobilnego ustawionego przed otworem wlotowym;
- wentylacja mechaniczna podciśnieniowa (ang. *negative pressure ventilation*) – technika polegająca na przetłoczeniu powietrza przez otwór wylotowy obiektu budowlanego z wykorzystaniem wentylatora mobilnego ustawionego na powierzchni otworu wylotowego,
- natarcie nadciśnieniowe (ang. *positive pressure attack*) – zabieg polegający na wentylowaniu pomieszczeń obiektu objętego pożarem (techniką wentylacji nadciśnieniowej) z równoległym podawaniem prądów wody przez rotę rozpoczynającą działania ratownicze.

Opisując kwestie wykorzystania wentylatorów, należy wskazać, że ich efektywność zależy w szczególności od:

- właściwego doboru otworu napowietrzającego (przez który będzie napływać struga powietrza wytwarzana przez wentylator mobilny),
- odpowiedniego usytuowania wentylatora przed otworem napowietrzającym (z uwzględnieniem odpowiedniej odległości od otworu oraz kąta nachylenia wirnika),
- zapewnienia drogi przetłaczania mas powietrza (w jak największym stopniu wolnej od przeszkód mogących negatywnie wpływać na osiąganą skuteczność oddymiania),
- odpowiedniego doboru otworu wylotowego, przez który będą usuwane produkty rozkładu termicznego,
- monitorowania warunków atmosferycznych (ze szczególnym uwzględnieniem wiatru).

Ze względu na charakter wykorzystania tego typu urządzeń (praca w niebezpiecznym środowisku pożarowym celem ratowania ludzi i mienia) bardzo ważne jest, aby parametry decydujące o skuteczności ich działania były odpowiednio zweryfikowane. Do najważniejszych cech techniczno-użytkowych, które warunkują efektywność działania wentylatorów mobilnych, można zaliczyć: wytwarzany objętościowy strumień przepływu powietrza oraz charakterystykę profilu i wektora prędkości (powierzchnię rozkładu strugi) [A1].

Badania ankietowe prowadzone wśród funkcjonariuszy Państwowej Straży Pożarnej [A12] umożliwiły wskazanie kierunków rozwoju związanych z poprawą ergonomii i z usprawnieniem cech techniczno-użytkowych charakteryzujących wentylatory mobilne. Największy procent użytkowników, bo aż 81,7% oczekuje redukcji poziomu hałasu, a od 53,5% do 48,3% - zmniejszenia masy i rozmiarów urządzenia. Tych parametrów dotyczą najczęściej oczekiwania strażaków, ponieważ wpływają bezpośrednio na nich jako użytkowników podczas obsługi lub transportu urządzenia. Następne uwagi badanych użytkowników są następujące: 46,4% respondentów oczekuje zwiększenia efektywności odprowadzania gazów spalinowych produkowanych przez silnik wentylatora, a 33,2% oczekuje zwiększenia objętościowego natężenia przepływu wytwarzanego przez urządzenie. Od 14,3% do 15,5% respondentów oczekuje wydłużenia efektywnego czasu pracy wentylatora mobilnego i wzrostu jego bezawaryjności (rys. 1).



Rys. 1. Oczekiwania strażaków w odniesieniu do rozwoju wentylatorów mobilnych; a – zwiększenie objętościowego natężenia przepływu strugi powietrza wytwarzanej, b – wydłużenie efektywnego czasu pracy, c – zmniejszenie gabarytu, d – zmniejszenie masy, e – niezawodność (bezawaryjność), f – redukcja poziomu hałasu; g – zwiększenie efektywności odprowadzania gazów spalinowych

Naukowcy z całego świata podkreślają, że deklarowane przez producentów parametry strumienia przepływu mogą być różne ze względu na brak ujednoliconej metody pomiaru. Ponadto ważne jest aby, ocena parametrów przepływu była prowadzona zgodnie z odpowiednio zwalidowaną metodą badawczą, a proces oceny wyników przebiegał z uwzględnieniem użytecznych i mierzalnych kryteriów. W Polsce jak dotąd

nie określono wymagań w zakresie metod oraz standardów pomiarowych stosowanych w celu oceny techniczno-użytkowych parametrów wentylatorów (w tym objętościowego natężenia przepływu). Stosowane obecnie wentylatory o parametrach deklarowanych przez producentów, są często wprowadzane do użytku bez stosownych badań weryfikujących skuteczność działania.

W ramach niniejszej pracy opracowano hybrydową metodę oceny parametrów przepływu wentylatorów mobilnych (połączenie eksperymentu w małej skali oraz symulacji CFD), umożliwiającą określenie parametrów objętościowego natężenia przepływu oraz wartości ciśnienia, uzyskiwanych podczas stosowania trzech metod badania wentylatorów:

- badania w kanale rurowym zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5801 (metoda A),
- badania charakterystyk profilu prędkości w wolnym przepływie – test opracowany przez National Institute of Standards and Technology (metoda B),
- badania parametrów przepływu w rzeczywistym obiekcie wielokondygnacyjnym (metoda C).

Opracowana hybrydowa metoda badawcza umożliwi określenie parametrów przepływu bez konieczności budowy kosztownej aparatury badawczej i wykonywania czasochłonnych eksperymentów. Opracowane narzędzie przeznaczone jest dla dwóch grup odbiorców. Pierwsza grupa to producenci wentylatorów mobilnych, którzy mogą wykorzystać tę metodę do testów technologicznych obejmujących weryfikację parametrów przepływu bez konieczności wykonywania czasochłonnych i kosztownych badań laboratoryjnych. Drugą grupę stanowią jednostki ochrony przeciwpożarowej, wykorzystujące wentylatory mobilne w działaniach ratowniczych. Metoda ta będzie użyteczna w procesie opracowywania instrukcji bezpieczeństwa pożarowego obiektów oraz powiatowych planów ratowniczych, m.in. w zakresie strategii oddymiania oraz ewakuacji osób i mienia na wypadek pożaru, w szczególności z budynków o dużym stopniu złożoności pomieszczeń oraz obiektów, w których wykorzystuje się duże ilości materiałów palnych.

W ramach pracy również zaprojektowano i zbudowano następującą infrastrukturę testową:

1. stanowisko badawcze wykonane zgodnie z wymaganiami normy ANSI/AMCA 240-22 służące do oceny charakterystyk przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne (wielkogabarytowy tunel aerodynamiczny),
2. stanowisko badawcze wykonane zgodnie z PN-EN ISO 5801:2017-12,
3. stanowisko badawcze do badań charakterystyk profilu prędkości strugi powietrza w wolnym przepływie,

4. poligonowe stanowisko badawcze do oceny parametrów przepływu wentylatorów mobilnych w wielokondygnacyjnym obiekcie budowlanym.

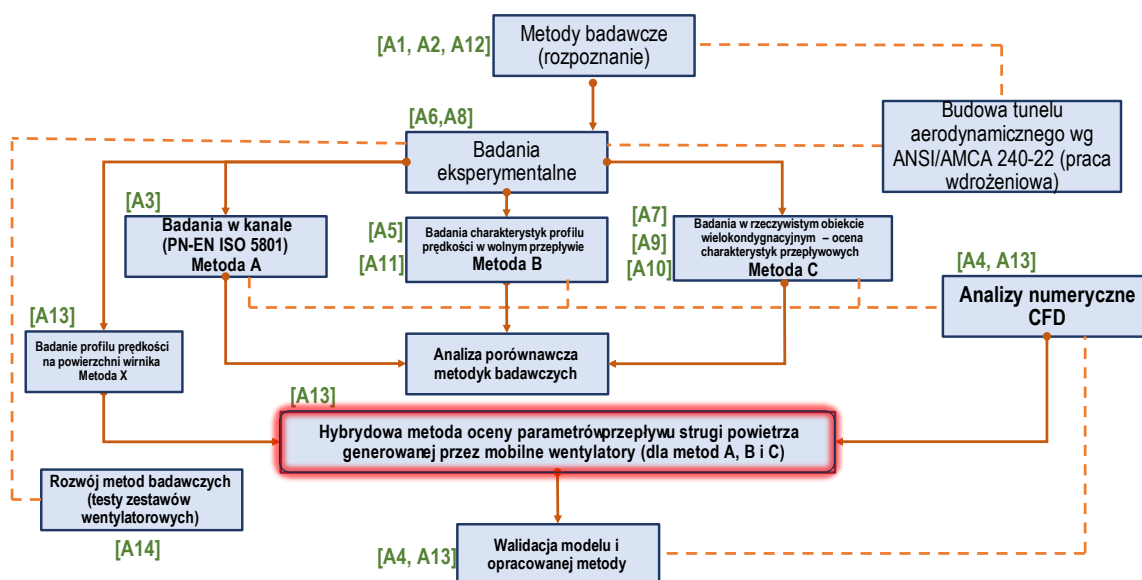
6. Określenie celu badawczego oraz zadań badawczych

W wyniku przeprowadzonej analizy literatury i po wykonaniu badań wstępnych sprecyzowano cel badawczy niniejszej pracy.

Jest nim opracowanie hybrydowej metody pomiaru parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne (połączenie badań w małej skali i symulacji CFD), umożliwiającej ich ocenę z użyciem trzech pełnoskalowych metod badawczych:

- A. badanie zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5801 (metoda A),
- B. badanie charakterystyk profilu prędkości w wolnym przepływie – test opracowany przez National Institute of Standards and Technology (metoda B),
- C. badania parametrów przepływu w rzeczywistym obiekcie budowlanym (metoda C).

Plan osiągnięcia celu naukowego przedstawiono na rys. 2.



Rys 2. Plan osiągnięcia celu naukowego

Ponadto określono następujące cele dodatkowe:

1. wyznaczenie na podstawie badań eksperymentalnych takich parametrów pozycjonowania dla grupy powszechnie stosowanych wentylatorów, przy których wentylatory tłoczą strugę charakteryzującą się największą efektywnością pod względem uzyskanych wartości objętościowego natężenia przepływu i ciśnienia w warunkach rzeczywistych (badania w rzeczywistym obiekcie budowlanym);
2. wyznaczenie na podstawie badań eksperymentalnych parametrów pozycjonowania konfiguracji wentylatorów (pracujących w tandemie), przy których wentylatory tłoczą

strugę charakteryzującą się największą efektywnością pod względem uzyskanych wartości objętościowego natężenia przepływu i parametrów ciśnienia w wielokondygnacyjnym obiekcie budowlanym.

Wyznaczono również cel wdrożeniowy.

Jest nim budowa następujących stanowisk testowych do oceny parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne:

1. tunelu aerodynamicznego wykonanego zgodnie z wymaganiami ANSI/AMCA 240-22,
2. kanału przepływowego wykonanego zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5801,
3. stanowiska do oceny charakterystyk profilu prędkości w wolnym przepływie – test opracowany przez National Institute of Standards and Technology,
4. poligonowego stanowiska badawczego do oceny parametrów przepływu wentylatorów mobilnych w wielokondygnacyjnym obiekcie budowlanym.

Aby osiągnąć zamierzony cel pracy, sformułowano następujące zadania badawcze:

1. analiza stosowanych metod pomiaru parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne wykorzystywane w akcjach ratowniczo-gaśniczych,
2. badania eksperymentalne z użyciem metod stosowanych do oceny parametrów przepływu (metody A, B i C),
3. porównanie stosowanych metod badawczych i ich ograniczeń,
4. odwzorowanie warunków metod pomiaru parametrów przepływu w środowisku modelowania numerycznego CFD,
5. opracowanie hybrydowej metody (połączenie badań w małej skali i symulacji CFD) umożliwiającej ocenę parametrów przepływu w warunkach badań A, B i C,
6. walidacja modeli numerycznych CFD badań przepływu (metod A, B i C),
7. propozycje rozwoju metod badawczych przez uwzględnienie badań nieznormalizowanych w zakresie oceny efektywności działania (wartości parametrów przepływu) zespołów wentylatorów oraz ich ustawień.

7. Metodologia badań i modelowania wykorzystana do wykonania zadań wpisanych w obszar planu badawczego

Aby osiągnąć cel badawczy ujęty w niniejszej rozprawie, zastosowano symulacje numeryczne CFD (program FDS w wersji 6.7.9) oraz wykonano następujące badania eksperymentalne z wykorzystaniem trzech stanowisk badawczych zaprojektowanych i zbudowanych w pełnej skali:

- A. Badanie zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5801,
- B. Badanie charakterystyk profilu prędkości w wolnym przepływie – test opracowany przez National Institute of Standards and Technology,
- C. Badania parametrów przepływu w rzeczywistym obiekcie budowlanym.

Każde z zadań wpisanych w obszar planu badawczego, dotyczących zarówno badań eksperymentalnych, jak i symulacji CFD, wymagało indywidualnego podejścia metodologicznego. Informacje na temat metody prowadzenia symulacji numerycznych przedstawiono w rozdziale 10, a dotyczące badań eksperymentalnych w podrozdziałach 7.1 i 7.2. Wszystkie przeprowadzone badania i analizy numeryczne zostały ukierunkowane na opracowanie metody hybrydowej (połączenie badań w małej skali i symulacji CFD), umożliwiającej ocenę parametrów przepływu wentylatora mobilnego w odniesieniu do trzech pełnoskalowych metod badawczych (A, B i C).

7.1. Badania eksperymentalne stosowane do pomiaru parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne wykorzystywane w akcjach ratowniczo-gaśniczych [A6,A8]

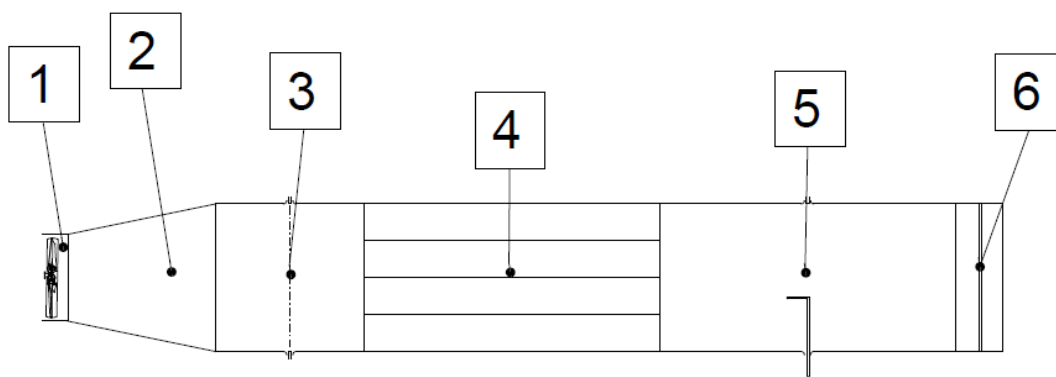
Pomimo pozornej prostoty działania wentylatora mobilnego (połączenie układu napędowego z wirnikiem osadzonym na ramie) należy podkreślić, że zjawiska związane z wytwarzaniem przepływów zapewniających skuteczną wentylację są dość złożone. Warto również przy tym wskazać, że mechanika płynów jako dziedzina zajmuje się jednym z najbardziej złożonych zagadnień fizyki – w szczególności jeśli rozpatrywane są przepływy turbulentne płynów, w tym przypadku gazów, o zróżnicowanych składach, gęstości i temperaturze. Na rynku europejskim dostępnych jest około 60 modeli wentylatorów mobilnych przeznaczonych do działań ratowniczych. Prawie połowa oferowanych wentylatorów jest napędzana silnikami spalinowymi, a druga połowa – silnikami elektrycznymi. Istnieje również podział wentylatorów związany z charakterem wytwarzanej strugi powietrza, który ma znaczący wpływ na zdolność do tłoczenia powietrza przez objętości wentylowane. Jednostki wentylatorowe wytwarzające strugę o mniejszym stopniu turbulentności będą zdolne do przetłaczania mas powietrza na większe odległości w warunkach nienadmiernego wytracania prędkości nawiewu. Jest

to cecha jednostek typu turbo, ze specjalnie profilowaną obudową wirnika stanowiącą swego rodzaju prostownicę przepływu. Tego typu jednostki będą wytwarzać najefektywniejsze parametry przepływu, kiedy zostaną ustawione w odległości 3-5 m przed otworem wlotowym prowadzącym do wentylowanej kubatury.

Na rynku są również dostępne wentylatory charakteryzujące się większą burzliwością przepływu – struga, którą wytwarzają w warunkach turbulencji (gdy następuje wzrost masy strumienia powietrza na skutek turbulentnego domieszania powietrza z otoczenia), znacznie szybciej wytraca prędkość, a ponadto może zmienić kierunek przepływu. Takim charakterem pracy cechują się jednostki typu konwencjonalnego, których obudowa najczęściej spełnia tylko funkcję zabezpieczającą wirnik wentylatora przed dostępem elementów zewnętrznych. Wentylatory konwencjonalne charakteryzują się największą zdolnością do przetłaczania strumienia przepływu powietrza, gdy są ustawione w niewielkiej odległości (1–2 m) od otworu drzwiowego. Z uwagi na zróżnicowanie jednostek wentylatorowych dostępnych na rynku bardzo ważne jest określenie ich efektywnego pozycjonowania, przy którym będą zdolne wytworzyć pożądane parametry przepływu. W procesie oceny wielkości objętościowego natężenia przepływu i ciśnienia bardzo ważna jest metoda ich wyznaczania.

Istnieje wiele testów badawczych, które można wykorzystać na potrzeby takiego badania. W zależności od tego, jaka metoda zostanie wytypowana do badań, uzyskane wyniki mogą się znacząco różnić, a ich niewłaściwa interpretacja może wprowadzać potencjalnych użytkowników w błąd i powodować niewłaściwą ocenę rzeczywistej przydatności w działaniach ratowniczych. Dlatego bardzo ważne jest, aby wybrana metoda jak najwierniej odzwierciedlała potencjalne warunki pracy wentylatora mobilnego podczas wspomnianych działań ratowniczych. W ramach niniejszej pracy wskazano zróżnicowane metody badawcze wykorzystywane do oceny parametrów przepływu. Są to m.in. badanie wg PN-EN ISO 5801, ocena charakterystyk profilów prędkości strugi powietrza w wolnym przepływie, test wykonywany w tunelu aerodynamicznym ANSI/AMCA 240-22, a także metody własne (autorskie, opracowywane przez naukowców z całego świata) stosowane celem określenia parametrów przepływu wytwarzanych przez wentylatory mobilne w rzeczywistych obiektach budowlanych.

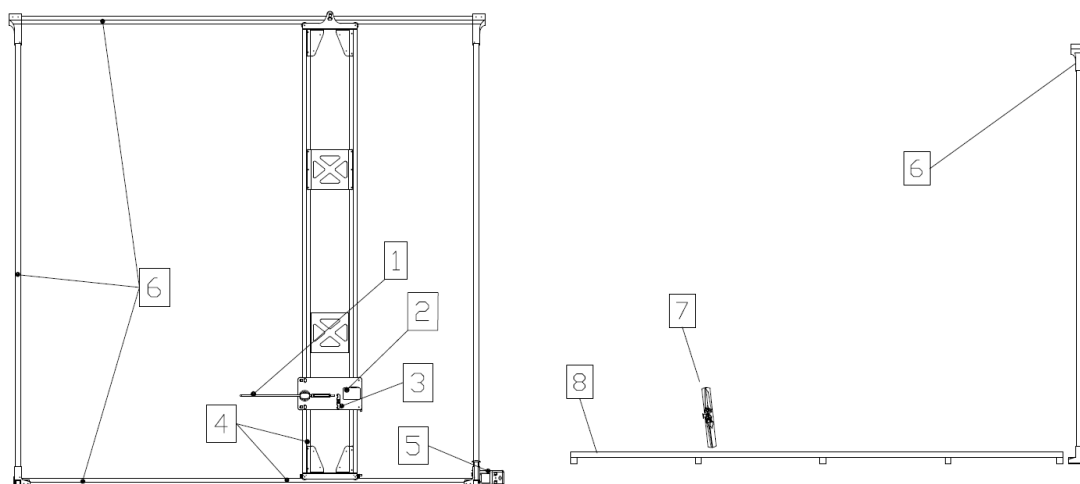
Obserwując trendy rynkowe i parametry użytkowe deklarowane przez producentów, należy wskazać że popularnym badaniem przeznaczonym do oceny parametrów przepływu jest metoda zgodna z wymaganiami PN-EN ISO 5801. Schemat stanowiska badawczego (konfiguracja kanałowa, typ B), wykorzystanego do badania wentylatorów mobilnych przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego wykonanego zgodnie z PN-EN ISO 5801; 1 – obszar mocowania wentylatora, 2 – sekcja symulacyjna (konfuzor kanałowy mający na celu dopasowanie wymiarów wirnika wentylatora do średnicy kanału badawczego), 3 – kanał stanowiska (o przekroju okrągłym) / sekcja pomiaru ciśnienia statycznego, 4 – kanał o przekroju okrągłym wyposażony w prostownicę przepływu w kształcie gwiazdy, 5 – kanał o przekroju okrągłym z miejscem pomiaru ciśnienia statycznego oraz dynamicznego, 6 – przepustnica dławiąca

Podczas tego testu wentylator jest montowany bezpośrednio do otworu wlotowego kanału badawczego z wykorzystaniem konfuzora dopasowującego wymiar wirnika do średnicy kanału. Należy zwrócić uwagę, że w normie PN-EN ISO 5801 (konfiguracja stanowiska w postaci kanału rurowego) określono relację między minimalną i maksymalną średnicą wirnika, jaka może zostać dopasowana do kanału badawczego. Ze względu na wskazane ograniczenie należy dobrać odcinki kanałów rurowych dostosowane do wielkości wirnika. Podczas badań na stanowisku badawczym wg PN-EN ISO 5801 dokonywana jest rejestracja parametrów ciśnienia statycznego oraz dynamicznego z wykorzystaniem przetworników ciśnienia oraz rurki Prandtla lub anemometru termooporowego. Na podstawie uzyskanych wartości ciśnienia zmierzonych w warunkach zmiennego położenia przepustnicy (elementu dławiącego) określana jest charakterystyka wentylatora (zależność objętościowego natężenia przepływu i ciśnienia statycznego).

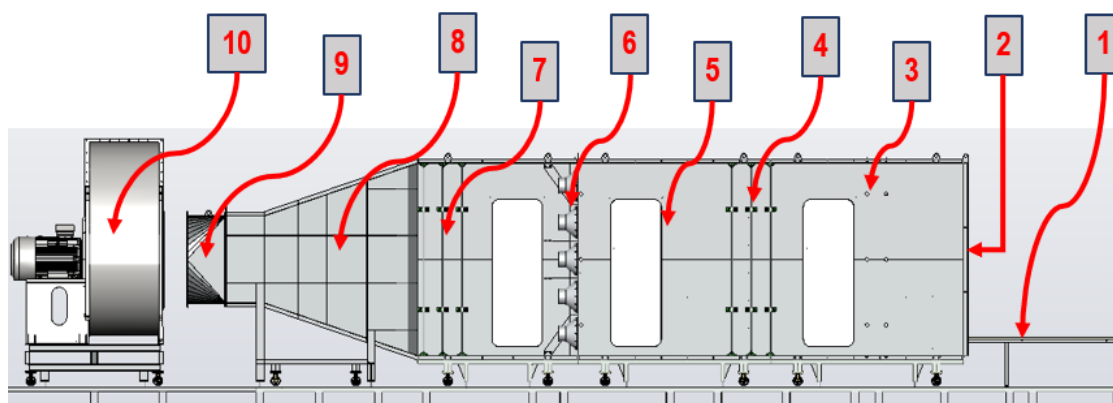
Kolejnym testem stosowanym na potrzeby oceny objętościowego strumienia przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne jest badanie charakterystyk profilu prędkości w zmiennych odległościach ustawienia wentylatora względem płaszczyzny pomiarowej. Metoda ta została zaproponowana przez Narodowy Instytut Norm i Technologii (NIST – National Institute of Standards and Technology). Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 4.



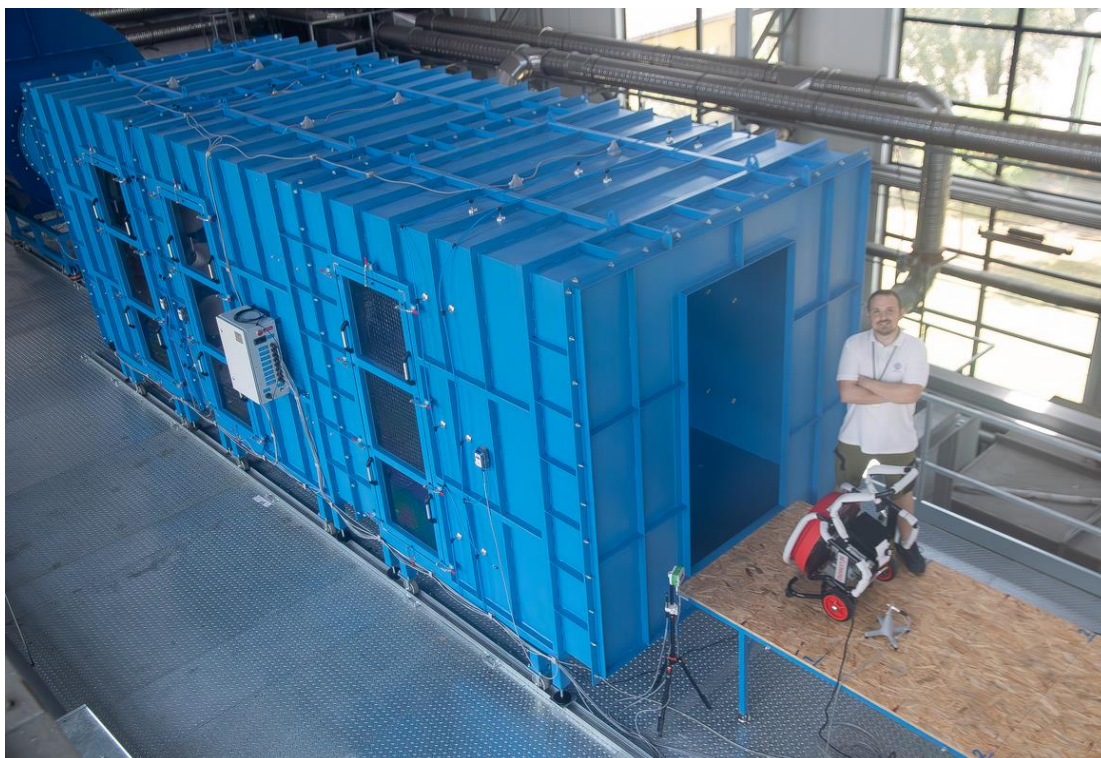
Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego do pomiaru rozkładu prędkości strugi generowanej przez mobilne wentylatory; 1 – sonda pomiarowa do oceny prędkości przepływu strugi powietrza, osadzona na elemencie transportującym; 2 – moduł pomiarowy umożliwiający akwizycję danych pomiarowych; 3 – wskaźnik laserowy do wskazywania odległości pozycjonowania mobilnego wentylatora przed stanowiskiem badawczym; 4 – pionowe i poziome prowadnice do przemieszczania elementu transportującego; 5 – układ napędowy; 6 – korpus stanowiska; 7 – badany wentylator; 8 – podest pozycjonowania wentylatora przed płaszczyzną pomiarową

Metoda badania polega na pomiarze (w odpowiednio zdefiniowanych punktach) prędkości strugi powietrza wytwarzanej przez wentylator, usytuowany w określonej odległości przed płaszczyzną pomiarową stanowiska badawczego. Zaletą tego testu polega na tym, że umożliwia on ocenę wartości objętościowego natężenia strumienia strugi powietrza w przepływie otwartym, który odzwierciedla rzeczywiste warunki pracy wentylatora z możliwością wprowadzenia przeszkód na drodze tłoczenia strugi powietrza np. fragmentu ściany z otworem (na powierzchni płaszczyzny pomiarowej) imitującym otwór okienny lub drzwiowy. Dzięki temu można ocenić wartość objętościowego strumienia przepływu w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Dodatkowo omawiany test uwzględnia parametry geometryczne związane z pozycjonowaniem wentylatora, tj. odległość ustawienia czy kąt nachylenia osi wirnika względem otworu wlotowego (np. drzwiowego). Pewną wadą związaną ze stosowaniem tej metody jest fakt, że badania są wykonywane z wykorzystaniem przeszkody bez warunków przeciwcisnienia. Metoda nie pozwala na ocenę objętościowego strumienia przepływu powietrza, biorąc pod uwagę ciśnienie, które może występować wewnątrz wentylowanej kubatury budynku (ze szczególnym uwzględnieniem czynników intensyfikujących to zjawisko, np. otwartego okna i wpływu wiatru napływającego na jego powierzchnię).

Badanie specjalnie zaprojektowane do testowania (w zakresie oceny parametrów przepływu) wentylatorów mobilnych w warunkach laboratoryjnych zostało opracowane przez American National Standard Institute i opisane w standardzie badawczym ANSI/AMCA 240-22 Laboratory Methods of Testing Positive Pressure Ventilators for Aerodynamic Performance Rating (Laboratoryjne metody badań mobilnych wentylatorów nadciśnieniowych w celu oceny ich charakterystyk przepływowych). Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 5, a na rys. 6 zaprezentowano ostateczną wersję aparatury ANSI/AMCA 240-22, zbudowanej w ramach prac wpisanych w obszar niniejszej dysertacji, stanowiących aspekt wdrożeniowy doktoratu.



Rys. 5. Schemat techniczny stanowiska badawczego zaprojektowanego zgodnie z wymaganiami ANSI/AMCA 240-22, na potrzeby oceny charakterystyk przepływowych wentylatorów mobilnych; 1 – podest techniczny do zamocowania badanego wentylatora, w określonej odległości i przy określonym kącie nachylenia osi wirnika, 2 – otwór wlotowy (symulujący drzwi) we frontowej części stanowiska badawczego, 3 – kanał o przekroju 2500x2500 mm i długości 2500 mm z sekcją pomiaru ciśnienia statycznego, 4 – zestaw trzech siatek o różnym stopniu perforacji, 5 – kanał o przekroju 2500x2500 mm i długości 1992 mm z sekcją pomiaru ciśnienia statycznego, 6 – zestaw dysz pomiarowych (25 szt.) o średnicy 160 mm każda (sekcja wyposażona w układ pomiaru ciśnienia przed i za dyszami), 7 – zestaw trzech siatek o różnym stopniu perforacji, 8 – konfuzor zmieniający przekrój z kwadratowego na okrągły, 9 – przyłącze do mocowania wentylatora pomocniczego, 10 – wentylator pomocniczy



Rys. 6. Stanowisko badawcze wykonane w CNBOP-PIB zgodnie z wymaganiami ANSI/AMCA 240-22 w trakcie prac wpisanych w obszar doktoratu wdrożeniowego

Test wykonywany według standardu ANSI/AMCA 240-22 polega na ustawieniu wentylatora mobilnego (w warunkach wolnego przepływu) w określonej odległości przed otworem drzwiowym komory badawczej, w której znajdują się prostownice przepływu, znormalizowane dysze, aparatura do wielopunktowego pomiaru ciśnienia statycznego oraz wentylator pomocniczy (zlokalizowany na końcu tunelu). Uruchomiony wentylator mobilny (będący próbką) z pewnej odległości nawiewa strugę powietrza na powierzchnię otworu drzwiowego, która następnie (w warunkach ciśnienia w zakresie od -25 Pa do 25 Pa kontrolowanego przy pomocy wentylatora pomocniczego) rozprzestrzenia się wewnątrz komory badawczej, przemieszczając się przez prostownicę przepływu oraz dysze pomiarowe. Na podstawie wartości ciśnienia zmierzonych wewnątrz komory badawczej w opisanych warunkach wyznaczana jest charakterystyka wentylatora.

Biorąc pod uwagę to co powiedziano dotychczas, należy stwierdzić, że test wykonywany zgodnie z amerykańskim standardem ANSI/AMCA 240-22, jest najodpowiedniejszym badaniem parametrów przepływu w przypadku tego typu urządzeń. W porównaniu z innymi opisanymi metodami badania pracy wentylatorów, test ten najlepiej odzwierciedla końcowe warunki stosowania wentylatorów mobilnych. Jego zaletą jest wykorzystanie międzynarodowej, uznanej procedury badawczej, w której ściśle opisuje się wymagania odnośnie do stanowiska badawczego, dotyczące rodzaju aparatury

pomiarowej oraz dokładności instalowanych urządzeń. Dodatkową cechą wyróżniającą stanowisko jest to, że w ramach opisanej metody podczas oceny parametrów przepływu uwzględnia się również geometryczne parametry pozycjonowania wentylatora przed stanowiskiem badawczym, tj. odległość od stanowiska, kąt nachylenia wirnika oraz wysokość jego osi względem podłoża. Ze względu na dużą funkcjonalność aparatury przeznaczonej do oceny parametrów przepływu wytwarzanego przez mobilne wentylatory taka infrastruktura została zbudowana w ramach aspektu wdrożeniowego doktoratu w CNBOP-PIB.

Analizując istniejące trendy badań w obszarze oceny parametrów przepływu, należy wskazać, że istnieje wiele pozycji literaturowych, w których opisano metody prowadzenia badań w rzeczywistych obiektach budowlanych. Tego typu badania wykonał m.in. Loughheed (2002), który ze swoim zespołem badawczym [1] opublikował wyniki dotyczące skuteczności wentylatora mobilnego w budynkach wysokościowych. W ramach tych prac przetestowano różne odległości pozycjonowania wentylatora przed otworem drzwiowym (tj. 1,2 m, 1,8 m, i 2,8 m). W trakcie tych testów potwierdzono, że objętościowy strumień powietrza był największy, gdy wentylator był zlokalizowany w bliskiej odległości od drzwi (1,2 m), niemniej jednak nie przekładało się to na stabilność przepływu powietrza na torze wymiany gazowej.

Podobne badania wykonał również Ezekoye z zespołem w 2002 r. [2]. Przedmiotem tych prac było zastosowanie wentylatora w budynku trzykondygnacyjnym. Dzięki eksperymentom autorzy wykazali, że odległość pozycjonowania wentylatora przed otworem drzwiowym ma wpływ na ilość przetłoczonego powietrza. Ponadto wskazali, że im większa jest objętość obiektu, tym mniej wydajna jest wentylacja z wykorzystaniem wentylatora z uwagi na większy obszar, w którym mogą występować nieszczelności struktury obiektu.

Spośród dostępnej literatury związanej z tematyką badań wentylatorów mobilnych w warunkach poligonowych należy zwrócić uwagę na dwa raporty National Institute of Standards and Technology dotyczące oceny parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne w wielkokubaturowych obiektach budowlanych. W pierwszym raporcie Kerber i in. w 2007 r. [3] zbadali zagadnienia dotyczące stosowania wentylacji nadciśnieniowej na terenie obiektów wysokościowych. Stwierdzili, że optymalny zakres odległości między otworem drzwiowym a wentylatorem wynosi od 1,2 m do 1,8 m. Doszli również do wniosku, że pozycjonowanie wentylatorów w kształcie litery V (pod kątem 45°) prowadzi do uzyskania lepszych parametrów przepływu niż konfiguracja szeregową.

W odniesieniu do obiektów wielokondygnacyjnych Lambert i in. (2014) kontynuowali eksperymenty mające na celu określenie najlepszej konfiguracji pozycjonowania wentylatorów w przestrzeni klatek schodowych [4]. Odnotowali oni, że w przypadku zastosowania pojedynczego wentylatora skuteczność wentylacji wzrasta wraz ze zmniejszaniem odległości pomiędzy wentylatorem a otworem drzwiowym. W odniesieniu do kąta nachylenia wykazali, że gdy pożar występuje na wyższych kondygnacjach, wówczas zmiana kąta nachylenia wirnika nie powoduje zwiększenia skuteczności nawiewu. Na koniec zwrócili uwagę, że większe objętościowe natężenie przepływu jest uzyskiwane przez zastosowanie większej liczby wentylatorów i że najlepszą konfiguracją (w przypadku zastosowania dwóch wentylatorów) jest usytuowanie ich w kształcie litery V i przy kącie nachylenia 60°). W 2017 r. Panindre [5] dokonał oceny możliwości stosowania wentylatorów w pożarach wieżowców z uwzględnieniem wpływu wiatru. Na podstawie badań wykazano, że w przypadku pożarów, podczas których występuje oddziaływanie wiatru, wraz ze wzrostem jego prędkości zmniejsza się skuteczność wentylatora (wielkość przetłaczanego strumienia powietrza).

Panindre w 2017 r. przeprowadził również badania mające na celu ocenę wpływu modyfikacji wielkości otworu wlotowego na wielkość objętościowego strumienia przepływu wentylatora w obiekcie budowlanym [6]. W wyniku tych badań wykazał, że skuteczność wentylatora mobilnego może wzrosnąć dzięki umieszczeniu kurtyny dymowej w górnej części powierzchni otworu drzwiowego. W swojej publikacji wskazał on w przybliżeniu idealne rozmieszczenie, jakim jest usytuowanie wentylatora w odległości 1,2 m od otworu drzwiowego oraz kurtyny dymowej zasłaniającej górną część otworu wlotowego, w odległości 0,3 m od górnej krawędzi wirnika wentylatora.

W ramach analizy literatury przedmiotu należy również wspomnieć o badaniach wykonanych przez Lamberta i in. w 2018 r. [7]. Dokonali oni oceny możliwości stosowania wentylatorów mobilnych na stacjach metra. W trakcie badań wykonali pomiar objętościowego natężenia przepływu powietrza wytwarzanego przez wentylatory wewnątrz stacji metra. W wyniku badań zespół wykazał, że wykorzystanie czterech wentylatorów pozwoli uzyskać przepływ zapewniający skuteczne oddymianie. W swoim opracowaniu autorzy podkreślili, że najlepsza konfiguracja wentylatorów została osiągnięta przez umiejscowienie trzech jednostek na peronie i jednej w obszarze szczytu schodów prowadzących na zewnątrz obiektu. Testy dotyczące wykorzystania wentylatorów na stacjach metrach wykonał również Le Corre (2001). Na podstawie analizy wykazał on, że istotnym zagrożeniem związanym z eksploatacją wentylatorów (nawet w pomieszczeniach wielokubaturowych) jest generowanie szkodliwych gazów spalinowych przez jednostki napędowe wentylatorów, przy czym efekt ten się potęguje wraz z zastosowaniem większej liczby wentylatorów [8]. Badacze prowadzili również

testy parametrów przepływu wewnątrz tuneli drogowych i kolejowych [9–13]. Houlin Ying z zespołem (2024) dokonał oceny parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory przewożne (mocowane na pojazdach pożarniczych) wewnątrz wielokubaturowego tunelu drogowego. Eksperymenty wykazały, że wraz ze wzrostem kąta nachylenia osi wirnika przewożnych wentylatorów, odległość w której następuje stabilizacja przepływu powietrza maleje. Przy kącie 0° przepływ powietrza stabilizuje się w odległości 190 m od wirnika wentylatora, a przy kącie 30° stabilizacja następuje na dystansie 60 m [14].

7.2. Badania eksperymentalne z zastosowaniem trzech metod oceny parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne (metody A, B i C)

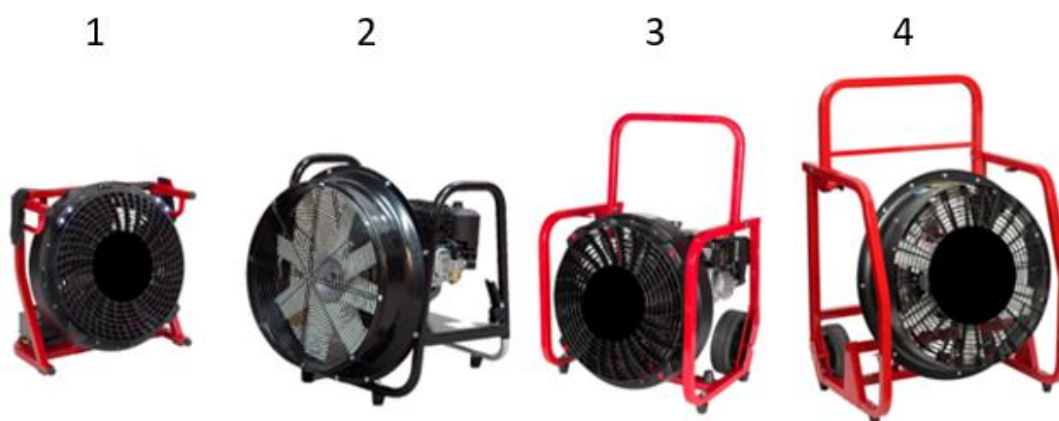
W ramach niniejszego rozdziału przedstawiono metody badawcze stosowane do oceny parametrów przepływu wentylatorów mobilnych tj.:

- 1) test wg PN-EN ISO 5801 – ocena parametrów przepływu w kanale rurowym (metoda A);
- 2) badanie charakterystyk profili prędkości strugi powietrza w wolnym przepływie – test na makiecie drzwiowej (metoda B);
- 3) badanie parametrów przepływu w wielokondygnacyjnym obiekcie budowlanym (metoda C).

Badania wykonano z wykorzystaniem powszechnie stosowanych w Polsce i Europie wentylatorów mobilnych (rys. 7). Wytypowano trzy wentylatory z napędem spalinowym (o zakresie mocy 4,1–6,3 kW i pojemności skokowej 163–270 cm³) oraz jeden wentylator zasilany silnikiem elektrycznym o mocy 0,6 kW. Parametry techniczne jednostek wentylatorowych podano w tabeli 1. Opis badań oraz analizę wyników poszczególnych metod przedstawiono w podrozdziałach 7.2.1–7.2.3.

Tabela 1. Parametry techniczne wentylatorów mobilnych wykorzystywanych w badaniach parametrów przepływu (metody A, B i C).

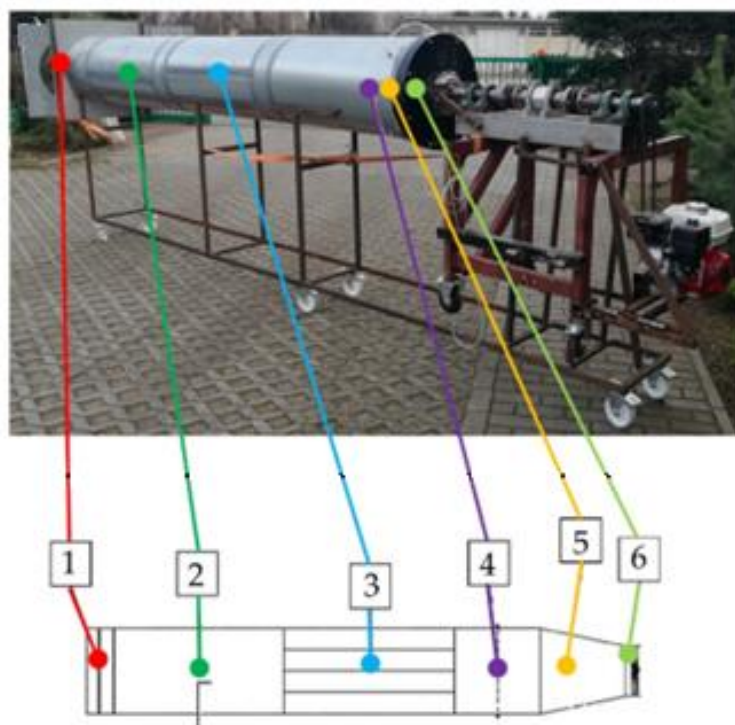
Parametr	1	2	3	4
Model	EX 50Li	FOGO MW 22	GX 350	GX 500
Producent	Ramfan (Spring Valley, USA)	FOGO Sp. z o.o. (Wilkowice, Poland)	Ramfan (Spring Valley, USA)	Ramfan (Spring Valley, USA)
Typ jednostki napędowej	Silnik z napędem elektrycznym	Silnik spalinowy o zapłonie iskrowym	Silnik spalinowy o zapłonie iskrowym	Silnik spalinowy o zapłonie iskrowym
Prostownica przepływu / system kierujący przepływ	+	-	+	+
Pojemność silnika [cm ³]	-	163	196	270
Moc silnika	0,6 kW	4,4 kW	4,1 kW	6,3 kW
Prędkość obrotowa przy pracy z pełną mocą	2790 rpm	3289 rpm	3585 rpm	3230 rpm
Impeller diameter	460 mm	495 mm	460 mm	600 mm
Liczba łopatek wirnika	5	8	9	7
Zakres regulacji kąta wirnika (położenia zalecane przez producenta)	0–18° (0°, 6°, 12°, 18°)	0–16° (0°, 6°, 11°, 16°)	0–18° (0°, 6°, 12°, 18°)	0–17° (0°, 5°, 11°, 17°)



Rys. 7. Mobilne wentylatory wykorzystane do badań

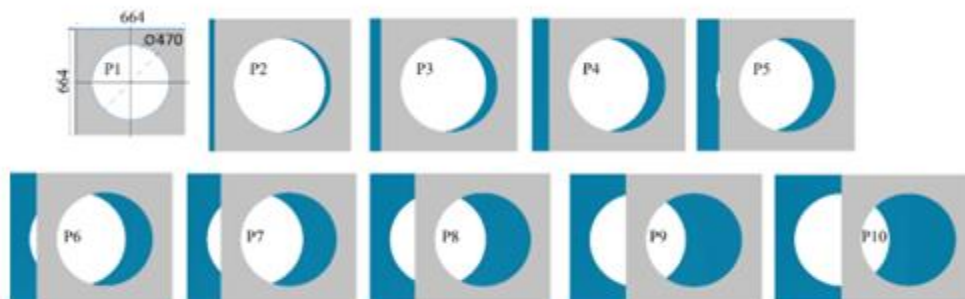
7.2.1. Badania parametrów przepływu zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5801 (metoda A) [A3]

Stanowisko badawcze wykonane zgodnie z PN-EN ISO 5801 [15] jest przeznaczone do wyznaczania charakterystyk przepływowych w kanałach rurowych i należy do kategorii typu B (wolny wlot / kanał na odcinku tłoczącym). Średnica kanału wynosi 475 mm. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Mobilne wentylatory nadciśnienie podczas badań zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5801; 1 – sekcja dławienia przepływu (przepustnica gilotynowa), 2 – pole pomiarowe wartości ciśnienia dynamicznego z wykorzystaniem rurki Prandtla – 14 punktów pomiarowych zlokalizowanych w osi kanału, metoda Log Czebyszewa zgodnie z normą ISO 3966 (2); 3 – prostownica przepływu w układzie gwiazdy, 4 – sekcja pomiaru ciśnienia statycznego z wykorzystaniem przetworników Setra o zakresie pomiarowym ± 1 cala słupa wody (pierścień – 4 punkty), 5 – konfuzor kanałowy mający na celu dopasowanie wymiarów wirnika wentylatora do średnicy kanału badawczego, 6 – obszar pozycjonowania wentylatora

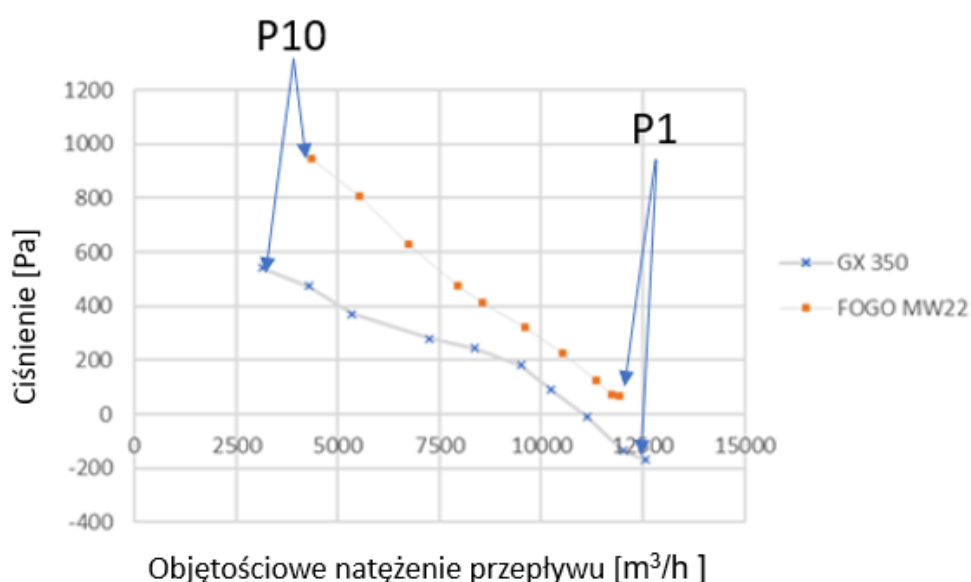
W trakcie testów dokonywano oceny wartości parametrów przepływu dla dziesięciu pozycji rozwarcia przepustnicy (dławicy). Przyjęte zakresy rozwarcia elementu dławiącego przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Zakresy otwarcia gilotynowej przepustnicy dławiącej podczas badań wg PN-EN ISO 5801 (zmniejszenie pola powierzchni przepływu [%]), przy czym: P1 – przepustnica w pełni otwarta, P2 – 7,1%, P3 – 15,1%, P4 – 22,4%, P5 – 29,7%, P6 – 35,5%, P7 – 43,5%, P8 – 57,5%, P9 – 70%, P10 – 81,4%

W analizie błędu pomiaru ciśnienia dynamicznego i statycznego za estymator wartości požądanej przyjęto średnią arytmetyczną, a za błąd estymatora przyjęto odchylenie standardowe średniej arytmetycznej.

Na podstawie badań wykonanych wg ISO 5801 (metoda A) określono charakterystyki przepływowe (rys. 10) dla dwóch jednostek wentylatorowych oznaczonych jako 2 – FOGO MW22 i 3 – GX350).



Rys. 10. Charakterystyki objęściowego przepływu powietrza w funkcji ciśnienia statycznego, określone zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5801 dla wentylatorów GX350 (wentylator 3) i FOGO MW 22 (wentylator 2)

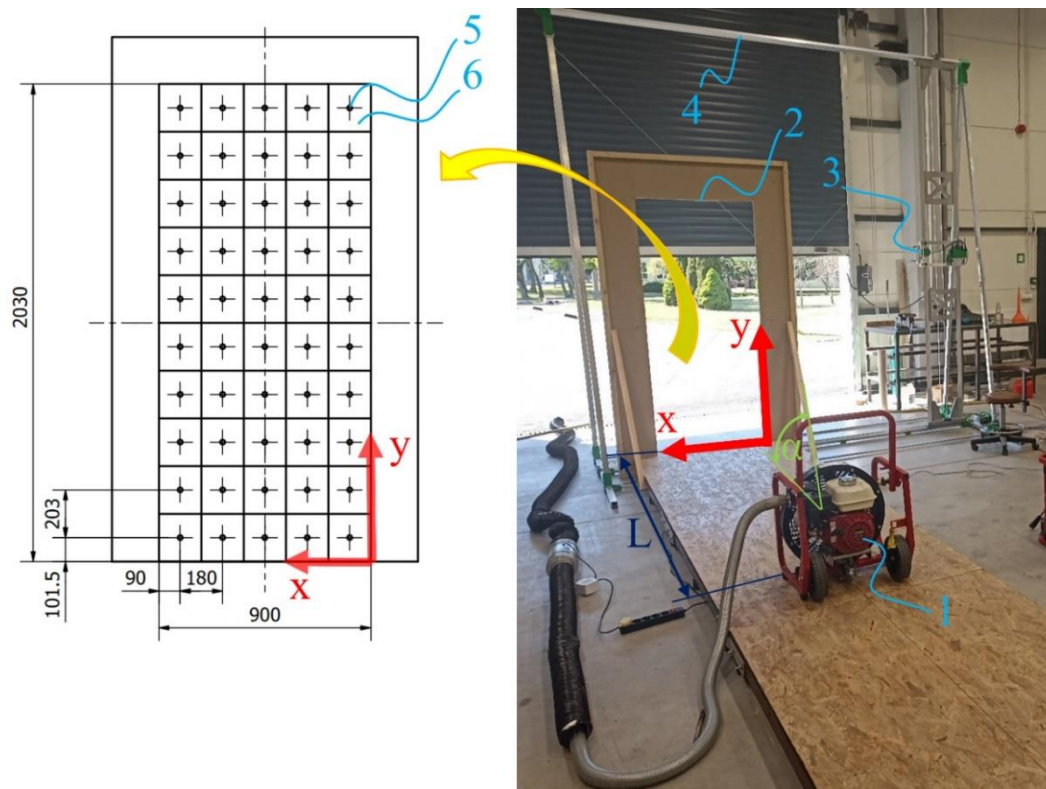
W przypadku wentylatora konwencjonalnego (2) maksymalny objętościowy przepływ powietrza wyniósł 11 942 m³/h (przy ciśnieniu 67 Pa), a w przypadku jednostki typu turbo (3) – 12 529 m³/h (przy ciśnieniu -169 Pa). Obie te wartości uzyskano przy pełnym otwarciu przepustnicy. Parametry przepływu zarejestrowane przy pełnym otwarciu przepustnicy najlepiej odzwierciedlają rzeczywiste warunki pracy wentylatora (wolny przepływ). Charakterystyki przepływu na rys. 9 wykazały, że jednostki wentylatorowe pracują w nieco inny sposób. W przypadku wentylatora typu turbo (3), w trakcie badań w konfiguracjach P1, P2, P3 uzyskano ujemne wartości ciśnienia statycznego w obszarze pozycjonowania wirnika wentylatora. Należy założyć, że jest to związane z tym, iż kanał kształtujący strugę nadaje jej na zewnętrznym promieniu wylotu ujemną składową prędkości promieniowej, co z kolei powoduje powstawanie obszarów oderwań i lokalnych podciśnień na ścianach kanału, gdzie wykonywany jest pomiar [16]. Występujące podciśnienie może również powodować zwiększenie strumienia masy tłoczonej przez wentylator mobilny oraz wzrost momentu oporowego i mocy.

Odmienne wyniki odnotowano w przypadku jednostki konwencjonalnej (2) – dla wskazanych konfiguracji położenia przepustnicy dławiącej (P1–P3) zarejestrowano dodatnie wartości ciśnienia. Występowanie nadciśnienia w tym przypadku również jest związane z konstrukcją wentylatora konwencjonalnego; jego obudowa została wykonana z siatki, pełniącej głównie funkcję zabezpieczenia i niepełniącą funkcji kierownicy przepływu [17]. Struga wygenerowana przez wentylator konwencjonalny rozprzestrzeniała się chaotycznie we wszystkich kierunkach – również na obszary pozycjonowania czujników ciśnienia statycznego.

Reasumując wyniki badań, należy wskazać, że objętościowy strumień przepływu wytwarzany przez wentylatory jest ważnym parametrem weryfikującym rzeczywistą skuteczność ich działania. Dla wskazanej metody dokonano oceny wartości natężenia przepływu; w przypadku wentylatora konwencjonalnego: 11 942 m³/h (przy ciśnieniu 67 Pa), a w przypadku wentylatora typu turbo: 12 529 m³/h (przy ciśnieniu -169 Pa). Ważnym wnioskiem dotyczącym prowadzenia badań zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5801 jest fakt, że metoda uniemożliwia ocenę wartości parametrów przepływu z uwzględnieniem rzeczywistych warunków pracy wentylatora tj. pracy w wolnym przepływie (rzeczywiste warunki stosowania mobilnych wentylatorów pożarniczych). Ograniczeniem metody PN-EN ISO 5801 (metoda A) jest to, że nie pozwala ona zidentyfikować geometrycznych parametrów pozycjonowania (odległości ustawienia i kąta nachylenia wirnika względem otworu wlotowego prowadzącego do obiektu), przy których wentylator pracuje najefektywniej. W celu uzyskania informacji na temat wpływu ustawienia wentylatorów na wartości parametrów przepływu przystąpiono do dodatkowych testów.

7.2.2. Badania charakterystyk profilu prędkości przepływu strugi powietrza – wolny przepływ (metoda B) [A5, A11]

Badania wykonano na stanowisku do oceny charakterystyk profilu prędkości strugi powietrza (metoda B). Ważnym aspektem eksploatacji stanowiska jest to, że w trakcie testów pozwala ono uwzględnić geometryczne parametry związane z pozycjonowaniem wentylatora, tj. odległość ustawienia czy kąt nachylenia wirnika względem otworu wlotowego (np. drzwiowego). Na potrzeby badań w zakresie oceny wielkości strumienia przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne (celem odzwierciedlenia ich rzeczywistych warunków pracy) płaszczyzna pomiarowa (przy możliwości sondowania powierzchni 2880x3070 mm) została zespolona z przeszkodą imitującą otwór drzwiowy o wymiarach 2,03x0,91 m, na powierzchni którego rozlokowano 50 punktów pomiarowych. Taki zabieg pozwalał na ocenę wartości masy powietrza transportowanej do wnętrza obiektu oraz masy wytracanej przez odbicie od zamocowanej przeszkody. Punkty pomiarowe rozlokowano równomiernie na całej powierzchni otworu drzwiowego – zgodnie z metodą równych płaszczyzn, opisaną szerzej w standardzie ISO 5221 [18]. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na powierzchni otworu drzwiowego oraz punkt referencyjny zgodny z punktem zerowym przyjętego układu współrzędnych przedstawiono na rys. 11. Moduł pomiarowy wyposażono w anemometr termooporowy TSI typu 8455 (o zakresie pomiarowym 0,127–50 m/s i dokładności ok. 1% odczytu), mocowany do ruchomego elementu transportowego, umożliwiający automatyczne, a zarazem powtarzalne zmiany punktów pomiarowych. Do transportu sondy zastosowano silniki krokowe (o dokładności pozycjonowania nie mniejszej niż 0,1 mm).



Rys. 11. Stanowisko badawcze; 1 – wentylator, 2 – makieta otworu drzwiowego, 3 – urządzenie pomiarowe, 4 – rama z przewodnikami urządzenia pomiarowego, 5 – przykładowy punkt sondowania, 6 – pole na powierzchni otworu drzwiowego, dla którego jest wykonywany pomiar w punkcie sondowania

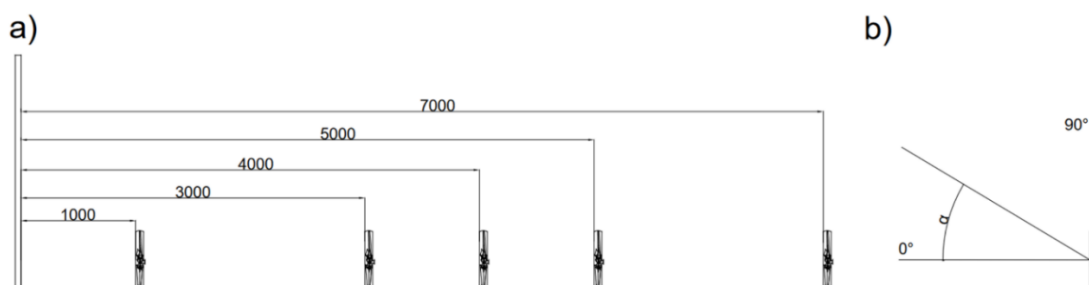
Program badawczy został skonfigurowany w taki sposób, aby częstotliwość akwizycji wynosiła 10 Hz, a czas trwania pomiaru wynosił 300 s. Podczas badań dokonano oceny charakterystyki profilu prędkości strugi powietrza wytwarzanej przez wentylator, przy czym powierzchnia jego wirnika była skierowana na płaszczyznę pomiarową otworu drzwiowego i usytuowana w zmiennej odległości od tej płaszczyzny tj. 1 m, 3 m, 4 m, 5 m i 7 m (rys. 12a) a kąt nachylenia wirnika zmieniał się od 0° do 18° (rys. 12b). Kąty nachylenia wirnika są ustawiane zgodnie z zaleceniami producentów, których konstrukcje wentylatorów posiadają czteropodziałowe mechanizmy regulacji pozycji. Wartości kątów nachylenia wirnika dla badanych konstrukcji przedstawiono w tabeli 1. W trakcie badań, z wykorzystaniem iloczynu średniej prędkości przepływu strugi powietrza V generowanej przez wentylator oraz powierzchni otworu drzwiowego S , oszacowano również objętościowy strumień Q napływający na powierzchnię otworu drzwiowego, zgodnie z równaniem (1):

$$Q = V \times S \left[\frac{m^3}{h} = \frac{m}{h} \times m^2 \right] \quad (1)$$

gdzie:

V – średnia prędkość przepływu strugi powietrza generowanej przez mobilny wentylator,

S – powierzchnia płaszczyzny pomiarowej otworu drzwiowego.



Rys. 12. Schemat programu badawczego; a) odległość wentylatora od otworu drzwiowego, b) kąt nachylenia wirnika względem podłoża, gdzie $\alpha = 0^\circ$ (oś wirnika wentylatora jest równoległa względem podłoża)

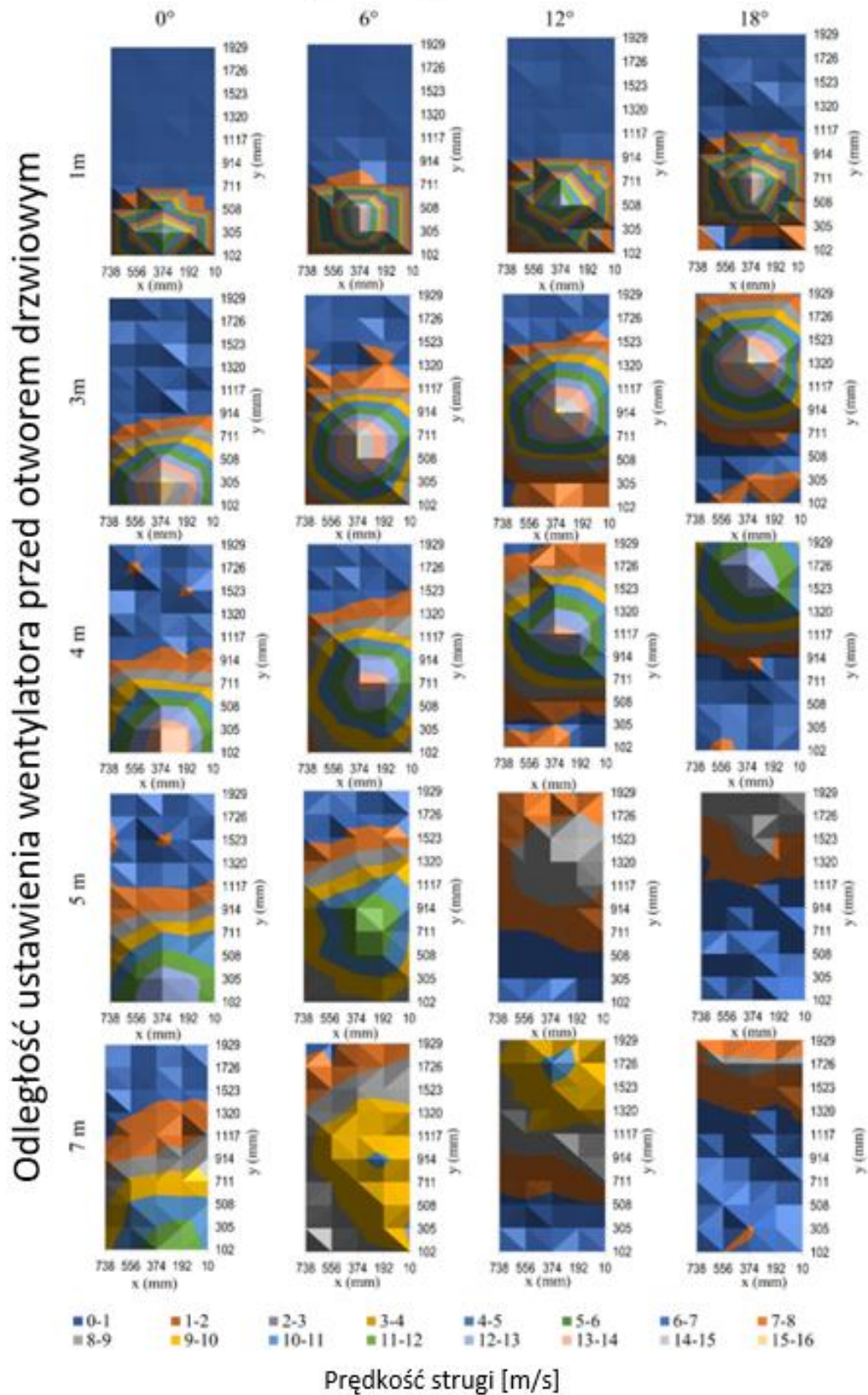
W analizie błędu pomiaru na potrzeby badań prędkości przepływu powietrza w wybranych punktach pomiarowych jako estymator zastosowano średnią arytmetyczną, a jako błąd estymatora odchylenie standardowe średniej arytmetycznej. W badaniach wykorzystano cztery wentylatory mobilne, powszechnie stosowane w działaniach ratowniczych w Polsce i Europie. Parametry techniczne badanych obiektów przedstawiono w tabeli 1.

Badania przeprowadzono w hali badawczej o kubaturze 1500 m^3 . Podczas testu brama wejściowa do hali była otwarta. W trakcie badań monitorowano warunki środowiskowe: temperaturę ($21^\circ\text{C} (\pm 2^\circ\text{C})$), wilgotność ($41\% (\pm 3\%)$), ciśnienie ($1003 \text{ hPa} (\pm 10 \text{ hPa})$). Testy wykonywano w warunkach, gdy prędkość wiatru była mniejsza niż $0,3 \text{ m/s}$. Wszystkie przeszkody były oddalone od układu badawczego (wentylator – droga przepływu powietrza – urządzenie badawcze) i znajdowały się w odległości od niego nie mniejszej niż $10 \times D$ (D – średnica wirnika największego badanego wentylatora).

Należy wspomnieć także o ograniczeniach wykonanego eksperymentu w zakresie badań wentylatorów mobilnych w przedstawionej konfiguracji. Doświadczenie przeprowadzono na makiecie symulującej otwór drzwiowy, na której zlokalizowano płaszczyznę pomiarową, bez kubatury (konstrukcji budynku) za otworem drzwiowym. Mając to na uwadze, należy zauważyć, że zastosowana metoda nie pozwala na ocenę objętościowego strumienia przepływu powietrza w warunkach przeciwcisnienia, jakie występuje w budynku, i którego wartość jest zmienna w zależności od jego konstrukcji oraz od panujących w nim warunków (np. od układu pomieszczeń wewnętrznych,

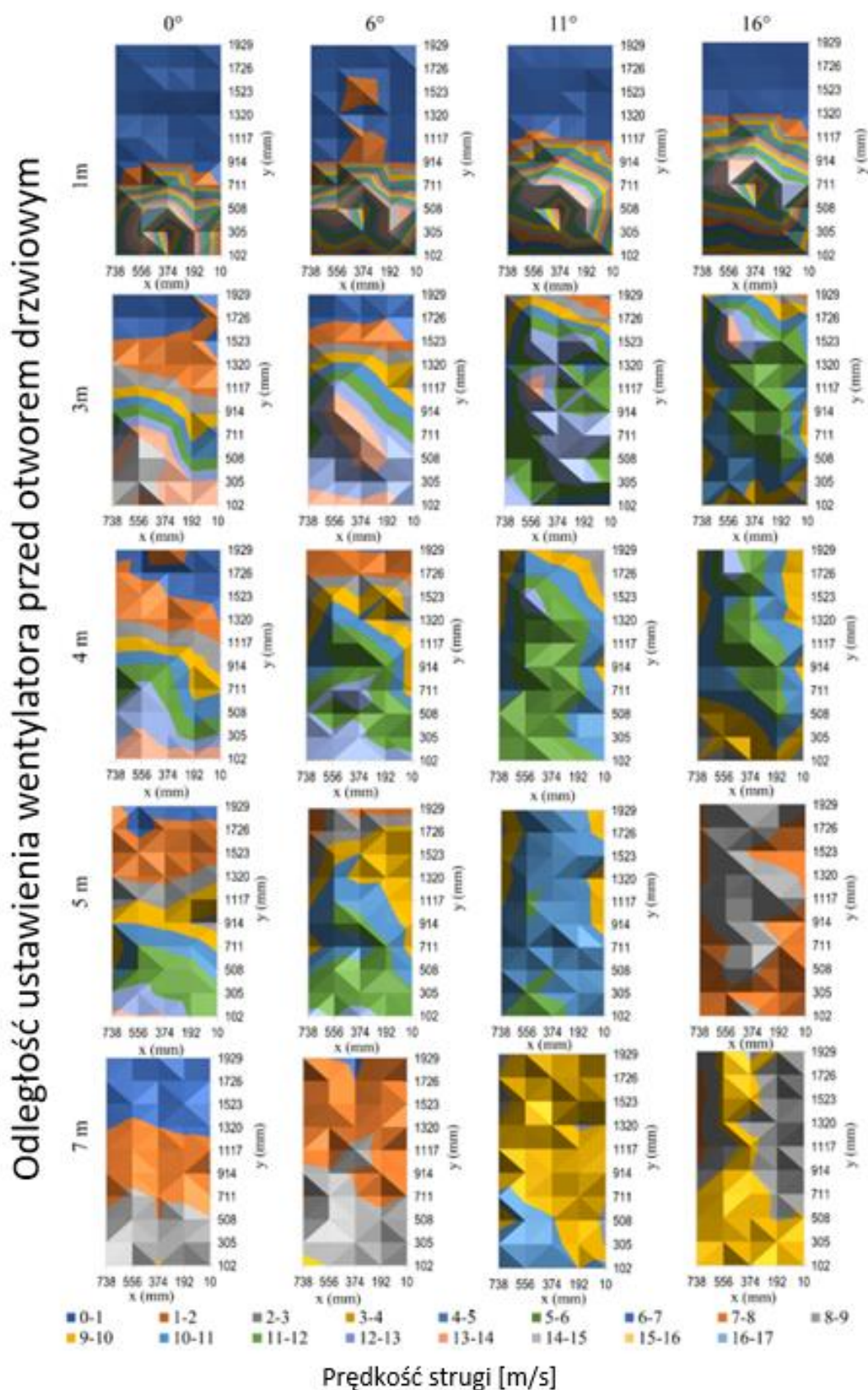
obecności przeszkód itd). Wyniki badań charakterystyk profilu prędkości przepływu na powierzchni otworu drzwiowego dla badanych wentylatorów (z uwzględnieniem parametrów pozycjonowania, tj. odległości i kąta nachylenia wirnika względem otworu drzwiowego) przedstawiono na rys. 13 (wentylator 1), na rys. 14 (wentylator 2), na rys. 15 (wentylator 3) i na rys. 16 (wentylator 4). Ze względu na dużą liczbę informacji uwzględnionych na rysunkach nie ujęto na nich danych o dokładności pomiaru. Opisano je w publikacji [A11].

Kąt nachylenia wirnika



Rys. 13. Prędkość przepływu strugi powietrza na powierzchni otworu drzwiowego (wentylator 1)

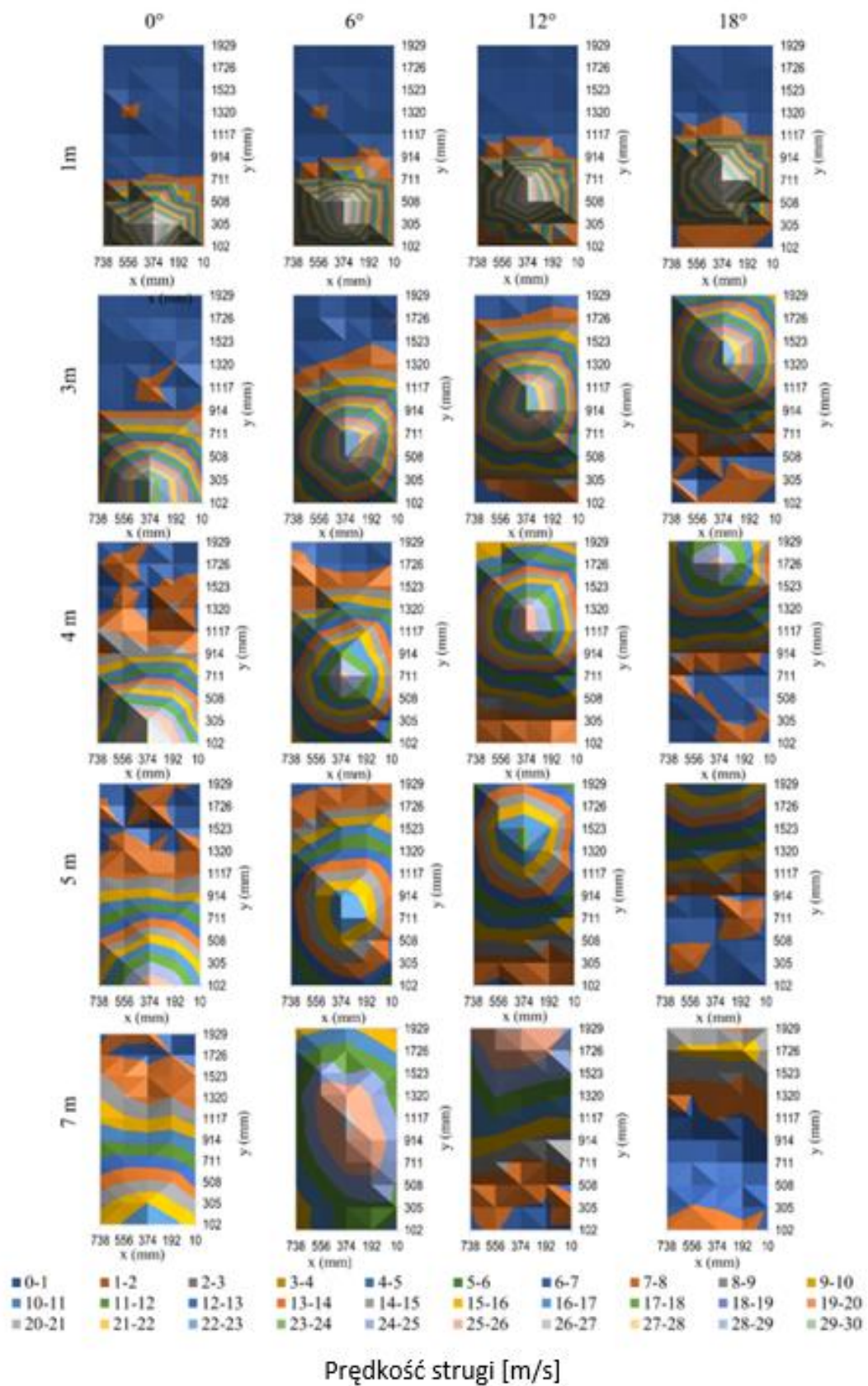
Kąt nachylenia wirnika



Rys. 14. Prędkość przepływu strugi na powierzchni otworu drzwiowego (wentylator 2)

Kąt nachylenia wirnika

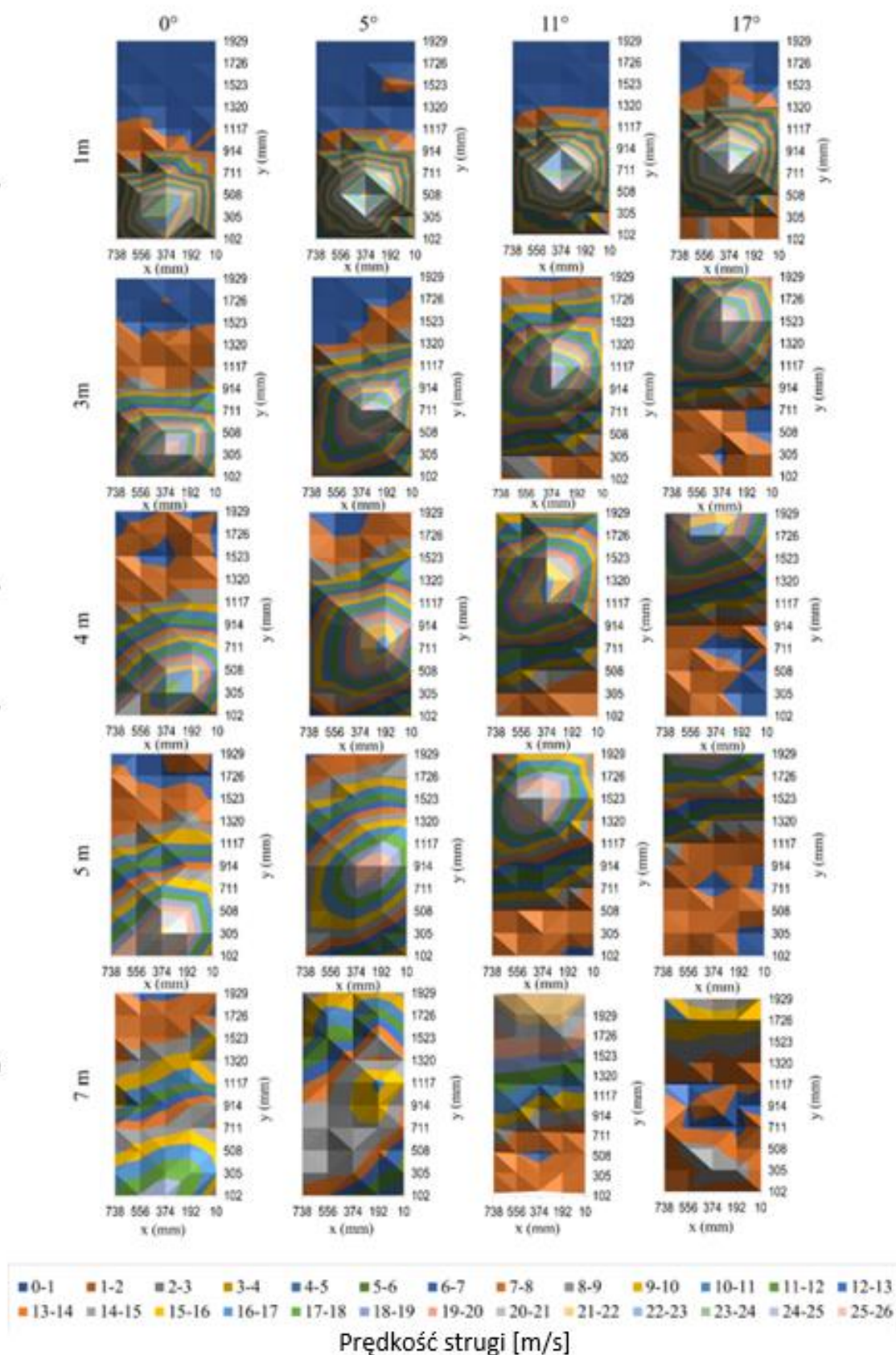
Odległość ustawienia wentylatora przed otworem drzwiowym



Rys. 15. Prędkość przepływu strugi na powierzchni otworu drzwiowego (wentylator 3)

Odległość ustawienia wentylatora przed otworem drzwiowym

Kąt nachylenia wirnika

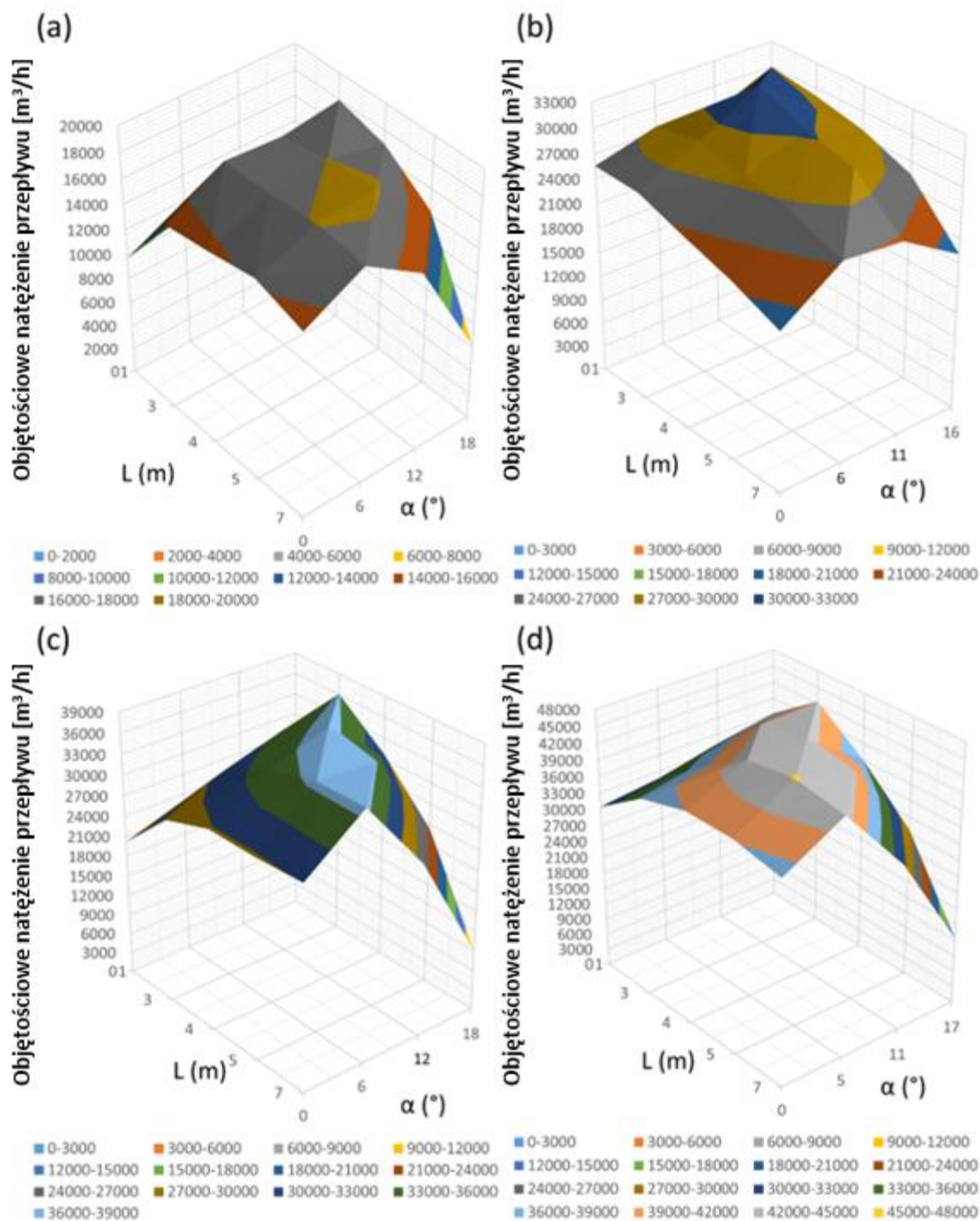


Rys. 16. Prędkość przepływu strugi na powierzchni otworu drzwiowego (wentylator 4)

Na charakterystykach prędkości przepływu strugi powietrza (rys. 13–16) można zauważyć, że gdy główny strumień powietrza koncentruje się zbyt blisko dolnej lub górnej części otworu drzwiowego, jego przepływ jest mniejszy, niż maksymalny możliwy do otrzymania. Największą wartość prędkości przepływu można uzyskać wtedy, gdy strumień powietrza jest kierowany w środkowy obszar otworu drzwiowego. Jeżeli osłona wentylatora jest ustawiona równolegle do podłoża lub jeżeli jest odchylona w drugą skrajną pozycję (od 16° do 18°), to strumień powietrza nie trafia w całości w otwór drzwiowy lub wytraca pęd w wyniku tarcia o powierzchnię podłoża. Stratę masy strumienia wykazali również Cimolino i in. (2012), badając technikę wentylacyjną „szczelny stożek”, ukierunkowującą przepływ tak, aby struga obejmowała cały otwór [17]. Analizując zagadnienia dotyczące prędkości przepływu strugi powietrza zmierzonej w otworze drzwiowym, należy wskazać, że Alonso z zespołem (2022) odnotowali, iż przepływ powietrza przez otwór drzwiowy bez aktywnej wentylacji koncentruje się w dolnej części tego otworu a jego prędkość wynosi około 0,8 m/s [19]. Kerber i Walton [20] podczas swoich badań z wykorzystaniem wentylatora mobilnego ustawionego frontowo w odległości 3,05 m od otworu drzwiowego uzyskali maksymalną prędkość przepływu powietrza wynoszącą 6 m/s. W dalszej analizie uzyskane wartości prędkości przepływu przeliczono zgodnie z równaniem (1), wyznaczając objętościowe natężenie przepływu w punktach pomiarowych. Taki zabieg wykonano dla każdej konfiguracji ustawienia wentylatorów (odległość i kąt nachylenia wirnika). Wpływ odległości między wentylatorem a otworem drzwiowym oraz kąta nachylenia wirnika na wielkość objętościowego strumienia przepływu przedstawiono na rys. 17; ze względu na czytelność rysunku nie oznaczono na nim błędów pomiaru, stąd średnie wartości prędkości i objętościowego natężenia przepływu oraz błąd pomiarowy przedstawiono w tabeli 2. Z kolei maksymalne wartości natężenia przepływu wraz ze wskazaniem ustawień wentylatora przedstawiono na rys. 18. Największe wartości natężenia strumienia przepływu zarejestrowano w miejscach występowania największych wartości prędkości przepływu. W zależności od mocy jednostki napędowej maksymalne objętościowe natężenie przepływu wynosiło od około 18 304 m³/h (± 2460 m³/h) (dla wentylatora o mocy 0,6 kW) do około 45 189 m³/h (± 4619 m³/h) (dla wentylatora o mocy 6,3 kW). Lambert i Merci (2014) badali podobne wentylatory wykorzystywane w akcjach ratowniczych. Uzyskane wartości natężenia przepływu wynosiły 30 800 m³/h w przypadku wentylatorów z silnikiem spalinowym oraz 30 000 m³/h w przypadku wentylatorów z napędem elektrycznym [4]. Garcia i in. [21] wskazali również, że wentylatory wykorzystywane do działań ratowniczych powinny generować strumień o objętości w zakresie 25 485–33 980 m³/h; wentylator ratunkowy używany przez

Kerbera i Waltona [22] charakteryzował się wydajnością na poziomie 23 900 m³/h, co jest zbieżne z wynikami przedmiotowych badań.

Największe wartości natężenia przepływu powietrza są uzyskiwane, gdy odległość między wentylatorem a otworem drzwiowym wynosi 3–5 m, a kąt nachylenia osi wirnika względem podłoża mieści się w zakresie 5–12°. Najbardziej korzystna jest trzecia pozycja nachylenia osi wirnika względem podłoża spośród czterech zalecanych przez producenta (12°). Jeden z badanych wentylatorów uzyskał najkorzystniejsze wyniki w pozycji drugiej (5°). Natomiast pozycja pierwsza nie była korzystna w żadnej próbie, stąd podczas włączania powietrza do wnętrza budynku niezalecane jest jej stosowanie. Dotychczas zmiany pozycji osi wirnika wentylatora były zalecane głównie podczas przetłaczania powietrza na pionowych ciągach komunikacyjnych, gdzie zmiana kierunku strugi powietrza ogranicza wytracanie pędu powietrza na przeszkodach zlokalizowanych wewnątrz obiektu (np. nietypowa konstrukcja klatki schodowej [23–24]). Należy zwrócić uwagę, że badania objętościowego przepływu powietrza były prowadzone przez otwór drzwiowy, w warunkach bez przeciwcisnienia. Wskazuje się, że na strumień powietrza, tłoczony do wnętrza obiektu ma wpływ ciśnienie które panuje wewnątrz, oraz przeszkody obecne na torze wymiany gazowej [23]. W odniesieniu do budynków wielokondygnacyjnych, Paninder i in. (2018) wykazali, że na wartość natężenia przepływu powietrza wpływa również różnica ciśnień występujących na różnych poziomach klatki schodowej [25].

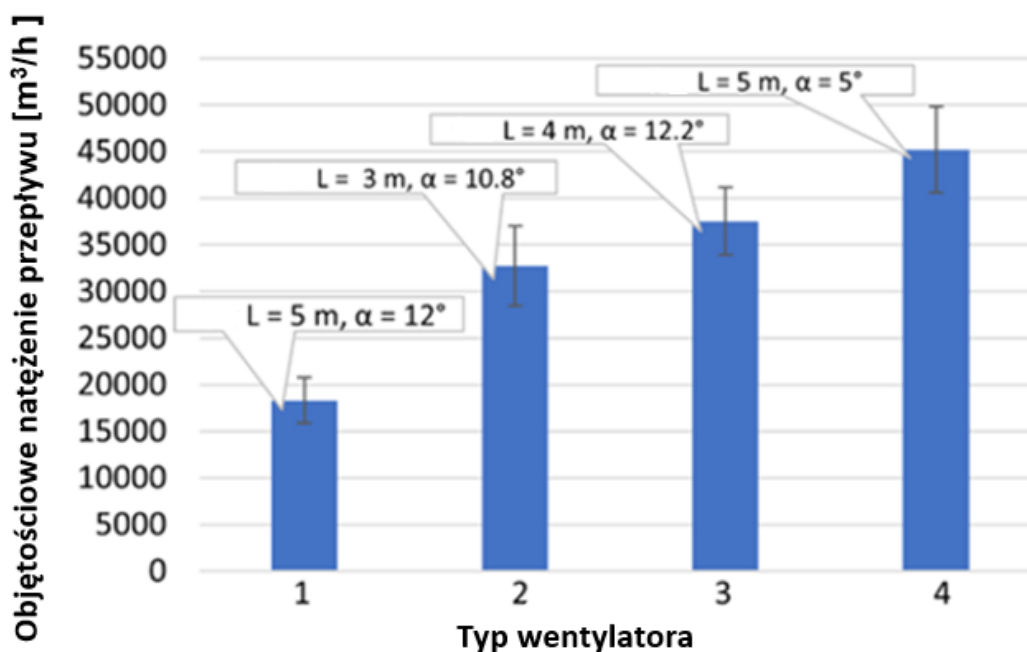


Rys. 17. Wpływ odległości między wentylatorem a otworem drzwiowym oraz kąta nachylenia wirnika na objętościowe natężenie przepływu powietrza przetłaczanego przez otwór drzwiowy; (a) wentylator 1, (b) – wentylator 2, (c) – wentylator 3, (d) – wentylator 4, L – odległość wentylatora od otworu drzwiowego, α – kąt nachylenia osi wirnika względem podłoża

Tabela 2. Wpływ odległości między wentylatorem a otworem drzwiowym oraz kąta nachylenia wirnika na objętościowe natężenie przepływu powietrza dla wentylatorów:

1, 2, 3, 4 (AVG – średnia arytmetyczna natężenia przepływu, SD – odchylenie standardowe przyjmowane za błąd pomiaru)

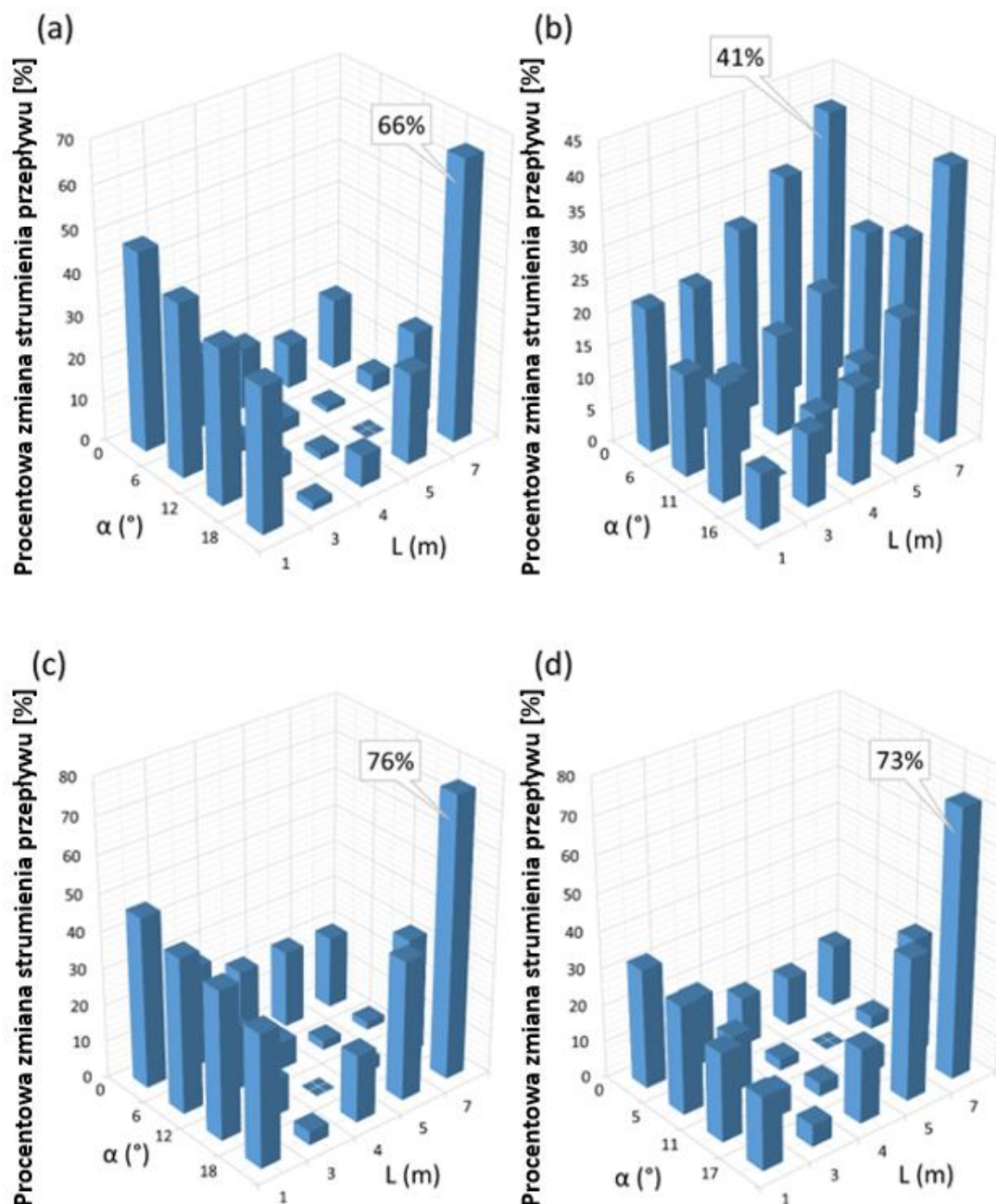
Wentylator 1									
		Kąt nachylenia osi wirnika wentylatora względem podłoża							
		0°		6°		12°		18°	
		AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD
Odległość	1 m	9660	613	10 764	811	11 547	1009	12 007	1180
	3 m	15 016	1839	17 587	2701	17 313	2231	17 966	2319
	4 m	15 620	1906	17 683	2547	18 013	2791	16 940	2146
	5 m	16 353	2004	18 058	2500	18 304	2460	14 322	1946
	7 m	15 192	2072	17 553	2726	14 550	2129	6185	1368
Wentylator 2									
		Kąt nachylenia osi wirnika wentylatora względem podłoża							
		0°		6°		11°		16°	
		AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD
Odległość	1 m	25 536	3150	27 597	3919	26 955	4304	29 943	4989
	3 m	25 426	2481	28 759	2958	32 744	4287	29 080	4350
	4 m	23 513	2337	27 671	2996	30 411	3391	27 816	3335
	5 m	21 764	2495	26 457	2770	28 901	2904	25 464	3753
	7 m	19 422	2324	24 360	2888	23 592	2968	19 122	3302
Wentylator 3									
		Kąt nachylenia osi wirnika wentylatora względem podłoża							
		0°		6°		12°		18°	
		AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD
Odległość	1 m	20 123	1404	21 722	1643	22 413	1492	24 039	2060
	3 m	27 230	2492	31 116	3258	33 808	3796	36 147	3555
	4 m	29 705	2973	34 712	4207	37 534	3624	30 686	2939
	5 m	29 695	2686	36 629	4023	36 249	3538	23 310	2691
	7 m	30 156	2938	36 754	3720	25 591	2993	9045	1955
Wentylator 4									
		Kąt nachylenia osi wirnika wentylatora względem podłoża							
		0°		5°		11°		17°	
		AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD
Odległość	1 m	30 494	1902	31 794	2092	34 249	2718	36 161	3255
	3 m	36 622	3755	38 212	4780	42 022	5212	42 483	3718
	4 m	39158	3528	43 867	5133	43 531	4707	36 027	3122
	5 m	39 215	3144	45 189	4618	42 340	3745	27 664	2996
	7 m	37 547	2924	43 600	1180	30 782	3056	12 398	812



Rys. 18. Maksymalne wartości objętościowego strumienia przepływu [m³/h] wraz ze wskazaniem ustawień wentylatora; L – odległość wentylatora od otworu drzwiowego, α – kąt nachylenia osi wirnika względem podłoża

Od właściwego ustawienia wentylatora może zależeć skuteczność akcji ratowniczej; dlatego wykonano analizę wpływu procentowego zmniejszenia natężenia przepływu powietrza w zależności od ustawienia wentylatora (rys. 19). Na potrzeby analizy przyjęto największą wartość objętościowego natężenia przepływu jako wartość odniesienia dla wybranego wentylatora. Badania dla przyjętych zakresów odległości od otworu drzwiowego i kątów nachylenia osi wirnika wykazały, że niewłaściwe ustawienie wentylatora może powodować redukcję natężenia przepływu powietrza przez otwór drzwiowy maksymalnie od 41% do 76% w zależności od rodzaju wentylatora. Po odrzuceniu w analizie wyników dla dwóch najmniej korzystnych odległości i kątów nachylenia osi wirnika (czyli skrajnych pozycji maksymalnych i minimalnych) największa redukcja natężenia przepływu mieści się w zakresie od 5% do 19% w zależności od typu wentylatora. Zmiana wartości objętościowego strumienia powietrza jest związana ze zmianą kierunku przepływu (odbiciem od przeszkody) oraz stopniem rozpraszania tłoczonych strugi [26]. Według U. Cimolino i in. [17] zmiana kąta nawiewu może zwiększyć wielkość przepływu powietrza nawet o 30%. Jednostki wentylatorowe wytwarzające strugę o mniejszym stopniu turbulentności (np. wyposażone w prostownice przepływu), dzięki ograniczeniu wytracania prędkości są zdolne do tłoczenia stabilnie ukierunkowanej strugi na większą odległość. Wentylatory charakteryzujące się większą

burzliwością przepływu pracują z mniejszą efektywnością – struga, którą wentylator wytwarza, wytraca prędkość w wyniku domieszania dodatkowego powietrza z otoczenia. Taka struga może również zmieniać kierunek przepływu.



Rys. 19. Procentowa redukcja objętościowego natężenia przepływu powietrza w zależności od ustawienia wentylatora; (a) – wentylator 1, (b) – wentylator 2, (c) – wentylator 3, (d) – wentylator 4, L – odległość wentylatora od otworu drzwiowego, α – kąt nachylenia osi wirnika względem podłoża

Na podstawie przeprowadzonych badań można zauważyć, że wyznaczenie ogólnych wytycznych dotyczących ustawienia wentylatorów (odległości pozycjonowania i kąta

nachylenia wirnika względem otworu drzwiowego) może być nieprecyzyjne i nie zapewniać ich efektywnej pracy. Wentylatory zastosowane do badań nie miały tabliczek informacyjnych wskazujących ich optymalne ustawienie. Wdrożenie takich instrukcji mogłoby przyczynić się do zwiększenia efektywności wentylacji w obiektach budowlanych w trakcie działań ratowniczych.

Konkludując, na podstawie badań wykazano, że właściwe ustawienie wentylatora mobilnego ma wpływ na objętościowe natężenie przepływu powietrza przez otwór drzwiowy. Podstawowymi parametrami wpływającymi na zdolność regulacji wartości strumienia przepływu powietrza podczas akcji ratowniczych są: zmiana prędkości obrotowej silnika, odległość wentylatora od otworu drzwiowego oraz kąt nachylenia osi wirnika względem podłoża. Zmiana ustawienia wentylatora może znacząco wpływać na prędkość strugi, która z kolei przekłada się na objętościowy natężenie przepływu. W przypadku czterech badanych wentylatorów powszechnie stosowanych w akcjach ratowniczych (o mocy od 0,6 kW do 6,3 kW wartość natężenia przepływu wynosi od około 18 304 m³/h (±2460 m³/h) (wentylator o mocy 0,6 kW) do około 45 189 m³/h (±4619 m³/h) (wentylator o mocy 6,3 kW). Najkorzystniejsze wartości natężenia przepływu są uzyskiwane przy odległości od otworu drzwiowego od 3 m do 5 m i nastawach kąta nachylenia osi wirnika względem podłoża w zakresie od 5° do 12°. Przy takich ustawieniach struga powietrza przepływa w centralnej części otworu drzwiowego. Można zauważyć, że ustawienie wentylatora w pozycji zapewniającej przepływ w środkowej części otworu drzwiowego zapewnia najlepsze wartości prędkości przepływu. Badania wykazały, że nawet podczas tłoczenia powietrza przez otwór drzwiowy do pomieszczenia o nawierzchni równoległej do powierzchni, na której ustawiony jest wentylator, korzystne jest ustawienie kąta nachylenia osi wirnika względem podłoża w pozycji drugiej lub trzeciej (od 5° do 12°) spośród czterech zalecanych przez producenta. Przyjmując największe objętościowe natężenie przepływu jako wartość odniesienia dla wybranego wentylatora (przy ustawieniu w odległości od 1 m do 7 m od otworu drzwiowego i przy zakresie badanych kątów nachylenia osi wirnika względem podłoża od 0° do 18°), należy zauważyć, że nieprecyzyjne ustawienie może spowodować redukcję natężenia przepływu w porównaniu z najkorzystniejszym wynikiem od 41% do 76% w zależności od rodzaju wentylatora. Natomiast po odrzuceniu najmniej korzystnych wyników (wartości skrajnych) po przyjęciu usytuowania jednostki w odległości od otworu drzwiowego od 3 m do 5 m i kąta nachylenia osi wirnika od 5° do 12° maksymalna redukcja natężenia przepływu wynosi od 5% do 19% w zależności od rodzaju wentylatora. Badania prowadzono w przestrzeni otwartej, w jednym pomieszczeniu, gdzie otwór drzwiowy stanowił sztucznie wytworzoną przeszkodę, co

może stanowi pewne ograniczenie w analizie wyników. Opracowana metoda badań nie pozwala na ocenę wartości objętościowego przepływu powietrza, biorąc pod uwagę ciśnienie, które może występować wewnątrz wentylowanej kubatury budynku w wyniku np. działania wiatru przez otwarte okno. Badania wykazały, że określenie ogólnych wytycznych dotyczących ustawień wentylatorów może być nieprecyzyjne. Należy więc opracować tabliczki informacyjne umieszczane na wentylatorach sugerujące korzystne ustawienia dla wybranych scenariuszy akcji ratowniczych i warunków pracy tych urządzeń.

7.2.3. Badania parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne w rzeczywistych warunkach pracy – testy na terenie wielokondygnacyjnego obiektu budowlanego (metoda C) [A7, A9 - A10]

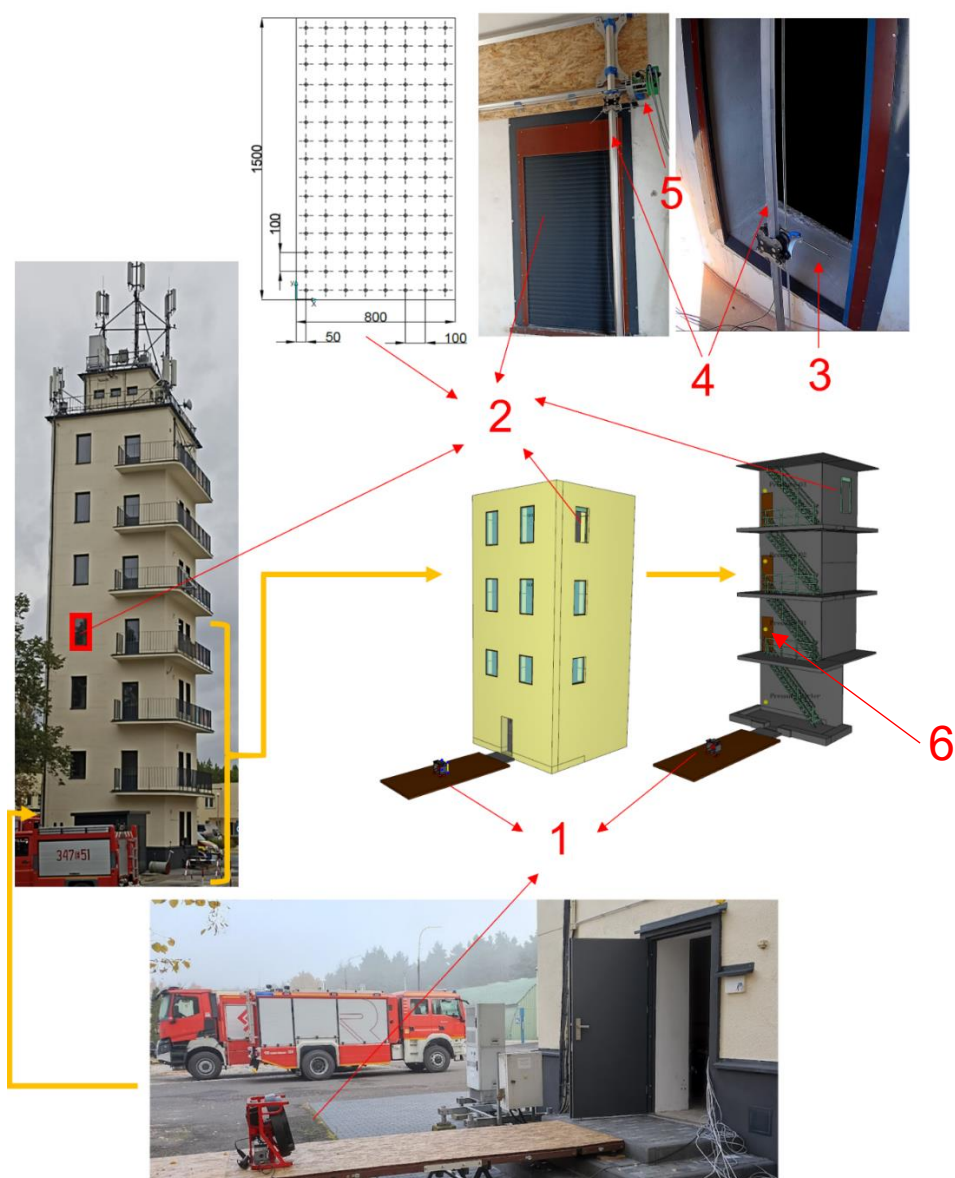
Badania wykonano z wykorzystaniem powszechnie stosowanych wentylatorów mobilnych: 2 – wentylator konwencjonalny, 3 – wentylator typu turbo (szczegółowe parametry badanych urządzeń przedstawiono w tabeli 1). Testy objętościowego natężenia przepływu wykonano w 7-kondygnacyjnym obiekcie budowlanym, wewnątrz którego dostosowano do badań cztery kondygnacje (stanowiące tor wymiany gazowej) przez szczelne odcięcie pozostałych pięter. Badaniem objęto tylko na 4 kondygnacje celem zachowania kompromisu między zakresem pomiarowym parametrów przepływu powietrza oraz utrzymaniem konfiguracji odzwierciedlającej klatkę schodową wielokondygnacyjnego obiektu budowlanego. Kubatura testowa (cztery kondygnacje) wynosiła 198 m³. Na najwyższej badanej kondygnacji, w oknie ulokowanym na południowo-wschodniej ścianie, zamontowano stanowisko testowe *flow resisting curtain* (FRC) przeznaczone do badania profilu prędkości przepływu strugi powietrza w otworach wylotowych obiektów budowlanych (np. okiennych). Stanowisko to umożliwia zmianę wielkości otworu, w którym dokonywany jest pomiar rozkładu pola prędkości, w celu regulowania oporów przepływu na potrzeby wyznaczania charakterystyk przepływowych.

W trakcie badań dokonywano pomiaru:

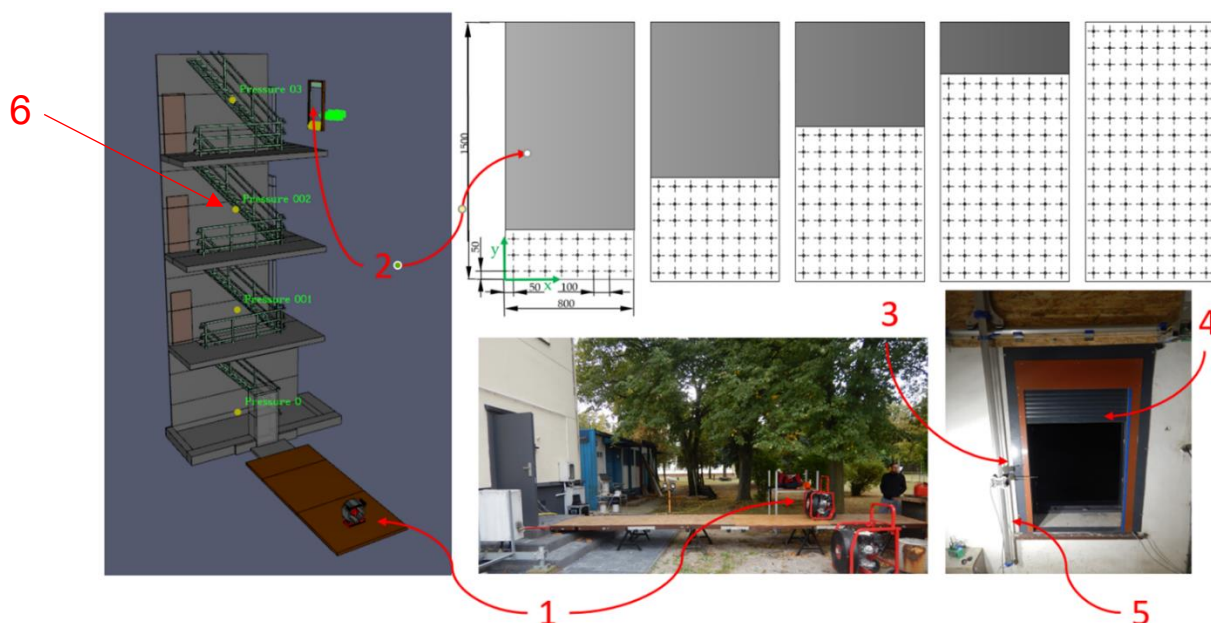
- prędkości przepływu strugi powietrza [m/s] na powierzchni otworu wylotowego, gdzie została zamontowana płaszczyzna pomiarowa; 120 punktów pomiarowych (pełne otwarcie otworu dławiącego) zlokalizowano równomiernie na płaszczyźnie testowej; moduł pomiarowy wyposażono w anemometr termooporowy TSI 8455 (o zakresie pomiarowym od 0,127 m/s do 50 m/s i o dokładności ok. 1%),

- ciśnienia (z użyciem przetworników ciśnienia Setra 265 o zakresie pomiarowym od 0 do 100 Pa i dokładności 0,25%), które rozlokowano po jednym na każdej z czterech kondygnacji.

Konfiguracja testowa stanowiska przeznaczonego do oceny efektywnych parametrów pozycjonowania wentylatora mobilnego została przedstawiona na rys. 20, a konfigurację przeznaczoną do oceny wpływu zmiany wielkości otworu wylotowego (okiennego) na parametry przepływu zaprezentowano na rys. 21.



Rys. 20. Konfiguracja stanowiska badawczego; 1 – wentylator mobilny, 2 – otwór okienny o powierzchni $1,2 \text{ m}^2$ (płaszczyzna pomiarowa ze 120 punktami), 3 – sonda pomiarowa (termoanemometr TSI), 4 – korpus stanowiska badawczego i prowadnice do transportu sondy pomiarowej, 5 – napęd (silnik krokowy), 6 – punkty pomiaru ciśnienia statycznego



Rys. 21. Konfiguracja układu testowego; 1 – wentylator, 2 – otwór okienny – wylotowy (płaszczyzna pomiarowa z podziałem – od lewej: P1 – 24, P2 – 48, P3 – 72, P4 – 96 i P5 – 120 punktów pomiarowych), 3 – sonda pomiarowa (termoanemometr TSI), 4 – korpus stanowiska badawczego i roleta modyfikująca wielkość otworu wylotowego, 5 – prowadnice do transportu sondy pomiarowej, 6 – punkty pomiaru ciśnienia statycznego

W trakcie badań związanych z identyfikacją parametrów efektywnego pozycjonowania wentylatorów mobilnych dokonywano oceny parametrów przepływu przy zmiennej odległości ustawienia wentylatora od otworu drzwiowego (od 1 do 7 m). W każdym badaniu kąt nachylenia wirnika ustawiano w taki sposób, aby oś wirnika była skierowana jak najbliżej środkowej części otworu drzwiowego. Informacje na temat korzystnych kątów nachylenia wirnika zostały uzyskane w trakcie badań oceny charakterystyk profilu prędkości w wolnym przepływie (metoda B). W przypadku wentylatora 1, kąt nachylenia wynosił: 1–3 m – 17°, 4 m – 11° oraz 5–7 m – 6°, a w przypadku wentylatora 2 ustawienie było następujące 1–3 m – 18°; 4 m – 12° oraz 5–7 m – 6°.

Podczas testów mających na celu ocenę wpływu zmiany wielkości otworu wylotowego (okiennego) na parametry przepływu, pomiar prędkości przepływu powietrza na powierzchni otworu wylotowego realizowano w oparciu o wymagania standardu ISO 5221 [18]. Ocena prędkości przepływu została wykonana dla pięciu powierzchni otworu wylotowego: P1 (0,24 m²), P2 (0,48 m²), P3 (0,72 m²), P4 (0,96 m²), P5 (1,2 m²). W trakcie tego testu wentylatory były usytuowane w następujących konfiguracjach: wentylator 2 (konwencjonalny) ustawiono w odległości 1 m od otworu drzwiowego, a kąt nachylenia osi wirnika wynosił 17°; wentylator 3 (turbo) ustawiono w odległości 5 m od otworu drzwiowego, a kąt nachylenia osi wirnika wynosił 6°. Wskazane parametry

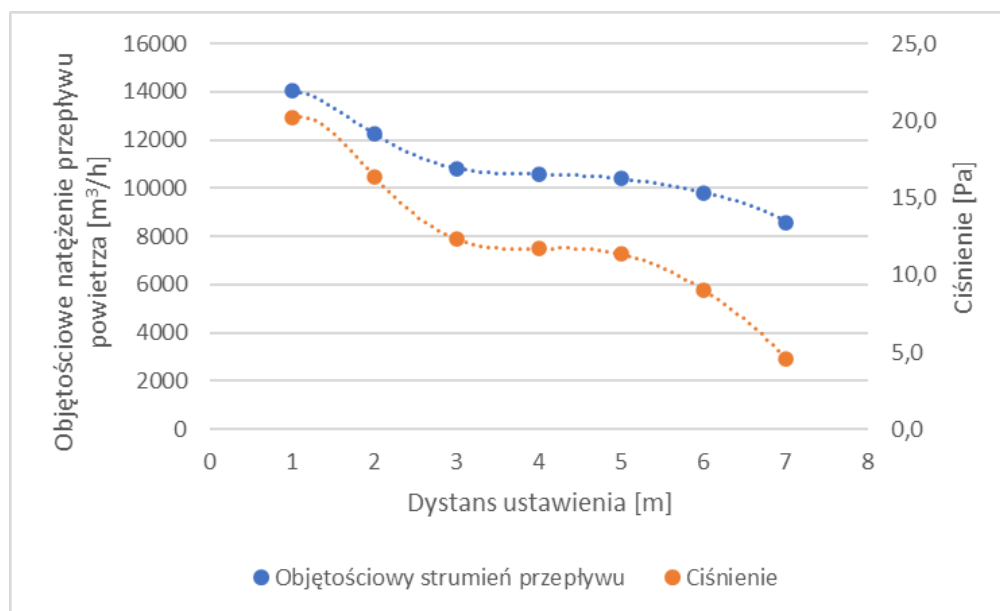
pozycjonowania zapewniają najefektywniejsze ustawienia obu jednostek (przy których w ramach prowadzonych badań odnotowano największe parametry przepływu).

Podczas badań w wentylatory pracowały z maksymalną prędkością obrotową. Częstotliwość akwizycji parametrów prędkości strugi powietrza (na stanowisku FRC) oraz wartości ciśnienia (mierzonych z wykorzystaniem przetworników ulokowanych na klatce schodowej) wynosiła 10 Hz. Pomiar prędkości przepływu trwał 30 s w każdym punkcie sondowania, a pomiar ciśnienia 300 s. Objętościowe natężenie przepływu Q zostało obliczone z użyciem zależności opisanej w podrozdziale 7.2.2.

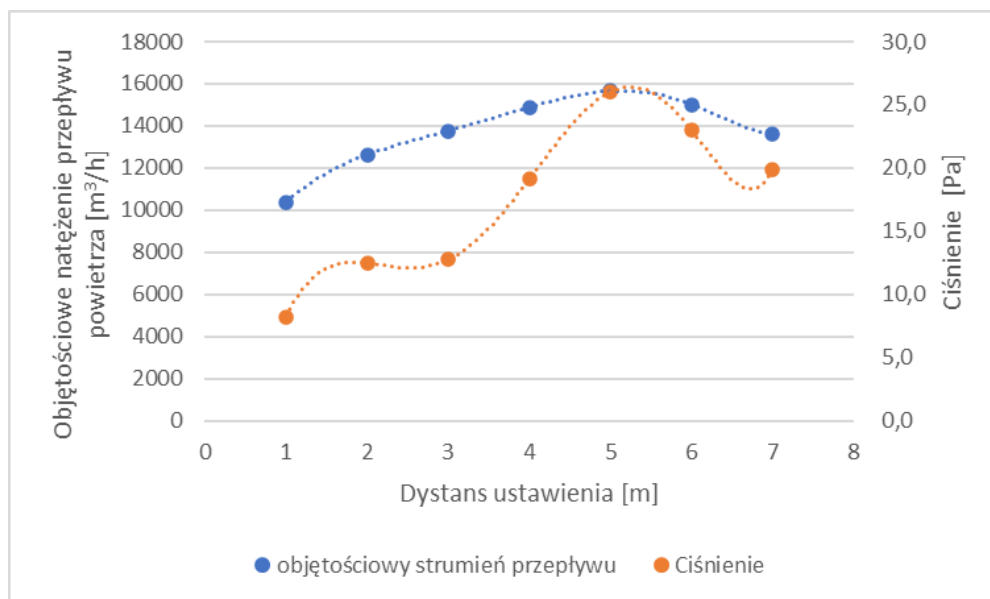
W analizie błędu pomiaru dla badań prędkości przepływu powietrza w wybranych punktach pomiarowych jako estymator zastosowano średnią arytmetyczną, a za błąd estymatora przyjęto odchylenie standardowe średniej arytmetycznej.

Badania obu konfiguracji wykonywano w okresie od sierpnia do września 2022 r. Podczas badań monitorowano warunki środowiskowe. Testy prowadzono w temperaturze 21°C ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) i wilgotności 50% ($\pm 10\%$), gdy prędkość wiatru nie przekraczała 0,2 m/s.

Wyniki badań charakterystyk parametrów przepływu – objętościowego natężenia przepływu oraz ciśnienia przedstawiono na rys. 22 i 23.



Rys 22. Charakterystyka objętościowego natężenia przepływu i ciśnienia statycznego w zależności od odległości od otworu drzwiowego – wentylator mobilny typu konwencjonalnego (2)



Rys 23. Charakterystyka objętościowego natężenia przepływu i ciśnienia statycznego w zależności od odległości od otworu drzwiowego (wentylator mobilny typu turbo (3))

Analizując uzyskane wyniki, należy wskazać, że wentylator 2 największą efektywność ($14\,020\text{ m}^3/\text{h}$) uzyskał, kiedy był usytuowany w odległości 1 m od otworu drzwiowego. Najmniejsza efektywność tej jednostki ($8591\text{ m}^3/\text{h}$) została odnotowana, gdy odległość od otworu drzwiowego wynosiła 7 m. W przypadku wentylatora 3 największą efektywność ($15\,656\text{ m}^3/\text{h}$) odnotowano, gdy odległość między badanym urządzeniem a otworem drzwiowym wynosiła 5 m. Z kolei najmniejszą efektywność ($10\,365\text{ m}^3/\text{h}$) zarejestrowano, gdy ta odległość wynosiła 1 m. Lambert i Merci (2014) badali podobne wentylatory wykorzystywane w akcjach ratowniczych. Uzyskane przez nich wartości natężenia przepływu wynosiły $30\,800\text{ m}^3/\text{h}$ (wentylatory z silnikiem spalinowym) oraz $30\,000\text{ m}^3/\text{h}$ (wentylatory z napędem elektrycznym) [4].

Analizując wartości objętościowego natężenia przepływu uzyskane w wyniku badań poligonowych (wentylator 1 – $14\,020\text{ m}^3/\text{h}$ oraz wentylator 2 – $15\,656\text{ m}^3/\text{h}$), zauważa się że są one znacznie mniejsze od tych, które deklarowali producenci, odpowiednio: $30\,000\text{ m}^3/\text{h}$ i $31\,799\text{ m}^3/\text{h}$.

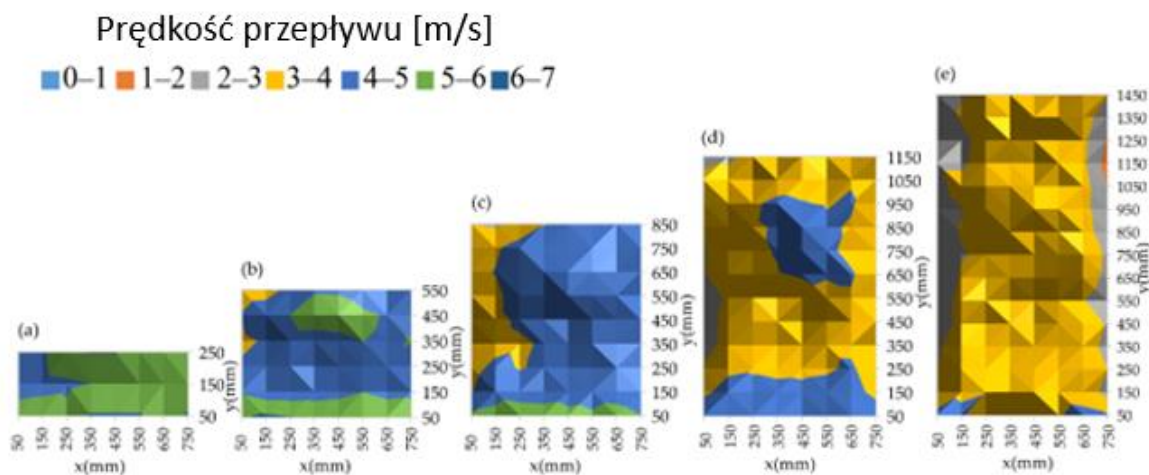
Wynika to stąd, że wskazane przez producentów parametry przepływu uzyskano na znormalizowanym stanowisku badawczym z użyciem procedury zgodnej z normą ANSI/AMCA 240-22 [27]. W tym przypadku należy zaznaczyć, że konfiguracja stanowiska badawczego (obecność wentylatora pomocniczego) umożliwiła wymuszenie przepływów i regulację oporów wewnątrz przestrzeni wentylowanej. Umożliwia to badanie szerszego fragmentu charakterystyk przepływowych generowanych przez badany wentylator, nawet w warunkach podciśnienia, gdy pompowany strumień jest dodatkowo zasysany do stanowiska badawczego, co pozwala na uzyskanie dużych

przepływów strumienia objętości przy braku nadciśnienia wewnątrz objętości testowej. Warunek ten dotyczy nierealistycznego przypadku znikomych strat ciśnienia w budynku. Założenie to jest szczególnie niedokładne w przypadku kanałów o złożonej geometrii, takich jak wielopiętrowe klatki schodowe. W konfiguracji testowej tor wymiany gazowej jest złożony z czterech pięter, co umożliwiło ocenę efektywności pracy wentylatorów mobilnych z uwzględnieniem przeszkód występujących w nominalnych warunkach pracy, gdzie na każdy przepływ objętościowy przetłaczany przez kubaturę przypada przeciwcisnienie powodowane oporami przepływu. W przypadku większości konfiguracji przeciwcisnienie jest proporcjonalne do kwadratu objętościowego natężenia przepływu. Ze względu na brak wentylatora pomocniczego w konfiguracji do badań terenowych możliwe było wyznaczenie jedynie fragmentu charakterystyki (w tym przypadku mniej więcej połowy); stąd różnice pomiędzy strumieniami zmierzonymi na obiekcie badawczym i na stanowisku ANSI-AMCA 240-22.

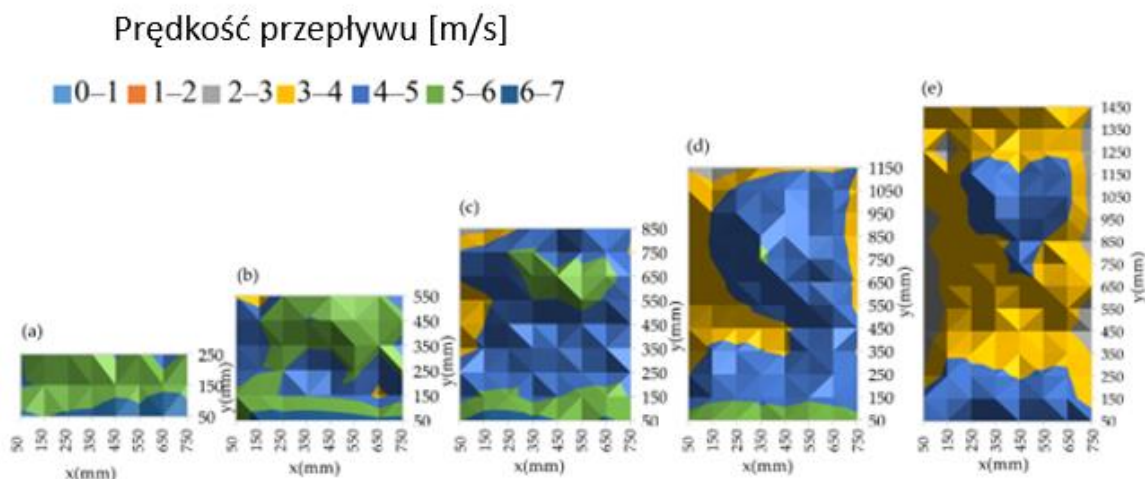
Porównując średnie wartości ciśnienia uzyskane w przypadku obu jednostek, należy zauważyć, że wentylator 1 wytworzył najwyższe ciśnienie w przestrzeni wentylowanej, wynoszące 20,2 Pa, przy ustawieniu w odległości 1 m od otworu drzwiowego, natomiast najniższe – 4,6 Pa – w odległości 7 m. Z kolei wentylator nr 2 wytworzył najniższe ciśnienie – 8,2 Pa, w odległości 1 m, a najwyższe – 26,0 Pa, w odległości 5 m. Zgodnie z zasadami teorii strumieni wolnych przepływów (z ang. *open jet flow*), wentylator pracujący przy przepływie swobodnym całą swoją pracę generuje w postaci energii kinetycznej strumienia. Wentylatory mobilne pracujące w trybie swobodnego przepływu tworzą swego rodzaju układ pompowy, którego wydajność zależy od takich składowych jak: rodzaj (w tym moc) wentylatora nadciśnieniowego, charakterystyka generowanego strumienia, towarzysząca mu turbulencja oraz dyfuzor (drzwi – stanowiące otwór spiętrzający). Mając to na uwadze, należy zauważyć, że opisane parametry z wyjątkiem otworu drzwiowego nie uległy zmianie w ustalonych warunkach ustawienia obu badanych jednostek. Wskazano, że otwór drzwiowy może mieć różne wymiary w zależności od przeznaczenia obiektu. Należy jednak zaznaczyć, że otwór w badanym obiekcie miał wymiary standardowe (2,03×0,9 m), takie jak większość otworów drzwiowych w budynkach wielorodzinnych, biurowych i użyteczności publicznej. W tym przypadku należy zauważyć, że największe wartości ciśnienia i natężenia przepływu uzyskano przy tych samych parametrach ustawienia, odpowiednio wentylatora 2 – 1 m, wentylatora 3 – w odległości 5 m. Biorąc pod uwagę uzyskaną korelację, należy zauważyć, że w przypadku zastosowania badanych wentylatorów w innych obiektach (ze zmienną konfiguracją pomieszczeń i z podobnymi wymiarami otworów) należy założyć, że wyznaczone optymalne parametry ustawienia nie będą znacząco inne.

Uzupełniając analizę specyfiki pracy obu wentylatorów, należy zauważyć, że wentylator 1 wraz ze zwiększaniem odległości od otworu drzwiowego pracował coraz mniej efektywnie. Wskazaną zależność można przypisać specyfice pracy wentylatorów konwencjonalnych wytwarzających strumień powietrza w kształcie stożka. Wraz ze wzrostem odległości zmniejsza się proporcjonalnie strumień powietrza wciąganego do wentylowanego obiektu. Opisując specyfikę pracy wentylatora 2, należy wskazać, że dzięki zastosowaniu specjalnie ukształtowanych łopatek w połączeniu ze specjalną obudową (będącą jednocześnie rodzajem prostownicy) generował on strumień powietrza w kształcie cylindra. W tym przypadku strumień powietrza z wentylatora posiadającego prostownicę (ustawionego w odległości 5 m od otworu drzwiowego) indukował dodatkowe porcje powietrza pobieranego z otoczenia. Jest to cecha charakterystyczna wentylatorów typu turbo. Opisane zjawiska związane z pozycjonowaniem wentylatorów mobilnych i oceną ich sprawności opisano w literaturze [1, 6, 17, 28, 29, 30].

Wyniki badań profili prędkości strugi powietrza, zmierzonych na powierzchni otworu wylotowego (o zmiennych wymiarach) przedstawiono na rys. 24 (wentylatora 1) i rys. 25 (wentylatora 2).

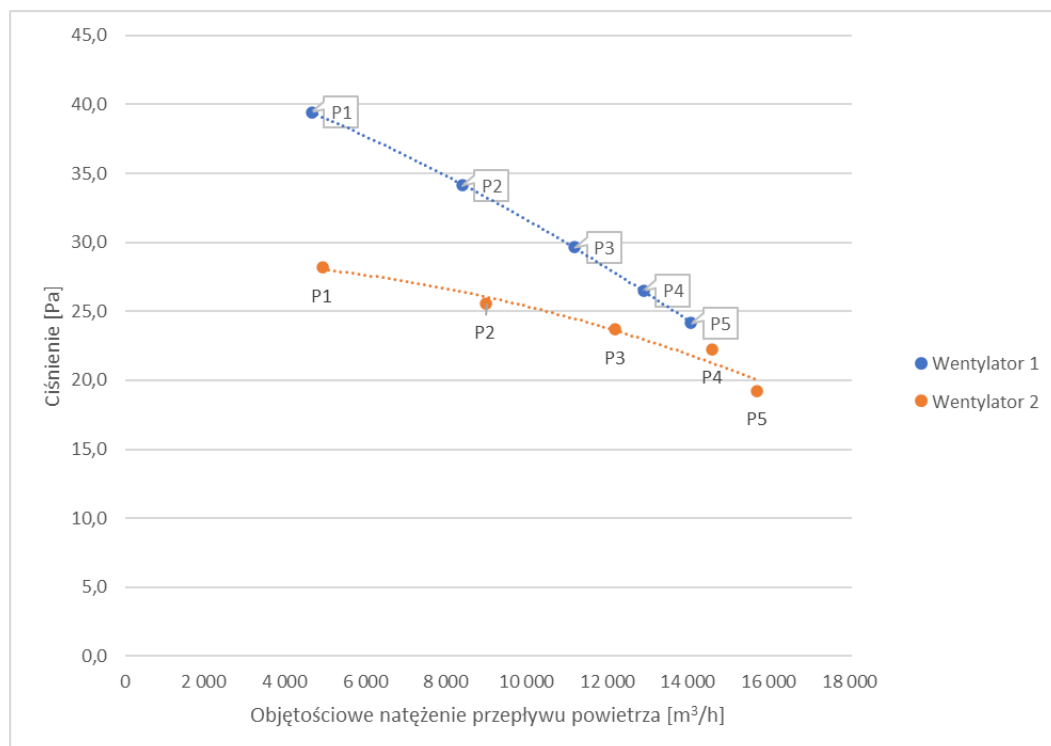


Rys. 24. Prędkości przepływu powietrza mierzone w otworze wylotowym na stanowisku FRC podczas badań wentylatora 1 umieszczonego w odległości 1 m od otworu drzwiowego, przy kącie nachylenia osi wirnika 17°; powierzchnie otworów wylotowych: (a) P1, (b) P2, (c) P3, (d) P4 i (e) P5.



Rys. 25. Prędkości przepływu powietrza mierzone w otworze wylotowym na stanowisku FRC podczas badań wentylatora 2 umieszczonego w odległości 5 m od otworu drzwiowego, przy kącie nachylenia osi wirnika 6° ; powierzchnie otworów wylotowych: (a) P1, (b) P2, (c) P3, (d) P4 i (e) P5.

Analizując charakterystyki prędkości przepływu powietrza mierzonych w otworze wylotowym (rys. 24 i 25), można zauważyć, że wraz ze wzrostem wymiarów tego otworu największa prędkość przepływu koncentruje się w dolnej i górnej części otworu. Wartości prędkości przepływu są zbieżne z wynikami Łapicza i jego zespołu (2018); odnotował on średnie prędkości przepływu powietrza w otworach wylotowych od 2 m/s do 7,6 m/s [31]. Największą objętościowy strumień przepływu uzyskiwano przy pełnym otwarciu otworu wylotowego. Podobna zależność została również zaobserwowana również przez Kutiego i in. (2018), a także Lamberta i Merciego (2014) [4, 32]. Wpływ przekroju poprzecznego otworu wylotowego na parametry przepływu – objętościowe natężenie przepływu i ciśnienie statyczne przedstawiono na rys. 26.



Rys 26. Charakterystyki przepływu (objętościowe natężenie przepływu i ciśnienie statyczne) wentylatorów 1 i 2, przy pięciu różnych powierzchniach otwarcia otworu wylotowego stanowiska FRC (P1 – P5)

Analizując uzyskane wartości parametrów przepływu (objętościowego strumienia przepływu w funkcji ciśnienia) wskazuje się, że w przypadku obu wentylatorów największe wartości objętościowego natężenia przepływu uzyskano przy największej powierzchni otwarcia otworu wylotowego – P5 (1,2 m²). W tych warunkach wentylator 1 przetłoczył 14 021 m³/h (±702,19 m³/h), a wentylator 2 – 15 656 m³/h (±838,66 m³/h). Najmniejszy objętościowy strumień przepływu został odnotowany przy najmniejszej powierzchni otwarcia płaszczyzny pomiarowej P1 (0,24 m²); wentylator 1 przetłoczył 4624 m³/h (±116,70 m³/h) a wentylator 2 – 4885 m³/h (±190,20 m³/h). Największe wartości ciśnienia zostały uzyskane przy najmniejszej powierzchni otwarcia otworu wylotowego P1 (0,24 m²). W przypadku wentylatora 1 odnotowano średnie ciśnienie 39,7 Pa, a w przypadku wentylatora 2 – ciśnienie 27,9 Pa.

Jak przedstawiono na rys. 26, oba przypadki różniły się zasadniczo pod względem charakterystyk przepływu. Różnice były największe przy najmniejszych wymiarach otworu wylotowego (P1), gdy strumień wentylatora napotykał największe przeciwcisnienie. Należy zauważyć, że podczas testowania obu jednostek wentylatorowych pięciokrotne zwiększenie powierzchni otworu wylotowego spowodowało jedynie trzykrotny wzrost strumienia objętości powietrza. Ponadto można również zauważyć (szczególnie w przypadku dużych przepływów – duża powierzchnia

otworu wylotowego), że największe spadki ciśnienia występują w obszarze otworów stropowych, zwężających tor przepływu w świetle klatki schodowej. Zależność wartości ułamka spadku ciśnienia występującego na regulowanej powierzchni otworu wylotowego od spadku ciśnienia na całej drodze przepływu przedstawiono na rys. 27. W obu przypadkach zarejestrowano niemal identyczny przebieg tej zależności pomimo odmiennych charakterystyk przepływu (rys. 26). Obserwacja ta sugeruje, że spadki ciśnienia na drodze przepływu są niezależne od rodzaju i położenia wentylatora, a raczej są funkcją konfiguracji geometrycznej budynku (co jest zgodne z teorią nieściśliwego przepływu wewnętrznego) [33]. Ponadto zaobserwowano, że dla danej konfiguracji, gdy powierzchnia otworu wylotowego jest większa niż 1 m², udział oporów przepływu wynosi poniżej 50%. Ostatnia krzywa pokazana na rys. 27 obrazuje zmiany wartości φ , opisane równaniem (2):

$$\varphi = \frac{\left(1/A_r\right)^2}{\left(1/A_r\right)^2 + \Sigma \left(1/A_c\right)^2} \quad (2)$$

gdzie:

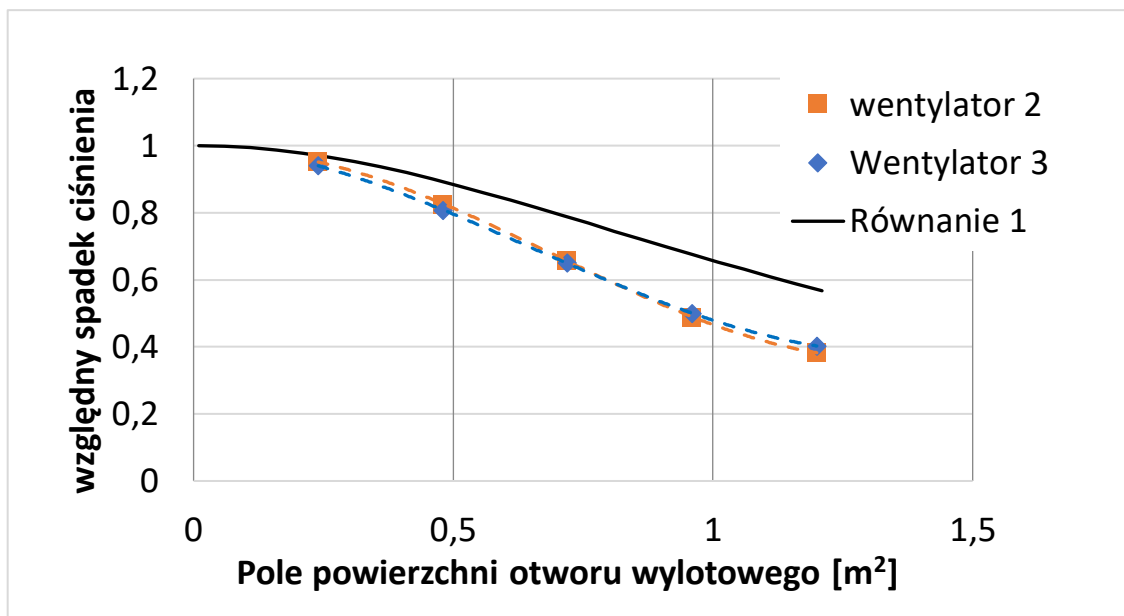
A_r – obszar zmiany powierzchni otworu wylotowego,

A_c – obszary kolejnych zwężeń wzdłuż toru przepływowego – trzy kolejne otwory stropowe pomiędzy kondygnacjami o powierzchni 2,4 m² każdy.

C_d – względny współczynnik przepływu.

Różnica pomiędzy wartościami φ uzyskanymi w wyniku eksperymentu i wartością φ uzyskaną z użyciem równania (1) wskazuje na wpływ wtórnych strat ciśnienia w wyniku tarcia o ściany, interakcji ze schodami i zmian kierunku przepływu. Zbliżenie wyników eksperymentów do równania (1) sugeruje jednak, że głównym źródłem oporów przepływu w budynku były zwężenia obszaru ścieżki przepływu.

Praktyczny wniosek, jaki można wyciągnąć z tych obserwacji, jest taki, że aby zwiększyć objętościowe natężenie przepływu wewnątrz wentylowanej kubatury, należy zmniejszyć opory przepływu występujące na drodze toru wymiany gazowej (np. zwiększyć otwory stropowe stanowiące przewężenia wewnątrz klatki schodowej) lub zwiększyć ciśnienie wytwarzane przez wentylator, co jest ważniejsze niż dalsze zwiększanie powierzchni otworu wylotowego.



Rys. 27. Spadek ciśnienia na powierzchni otworu wylotowego [P1–P2] jako ułamek całego spadku ciśnienia na drodze przepływu; równanie (1) dotyczy $C_d = 0,7$

Podsumowując uzyskane wyniki, należy wskazać, że właściwe określenie parametrów geometrycznych pozycjonowania wentylatora oraz właściwe dobranie wymiarów otworu wylotowego wpływa na efektywność wentylacji obiektu budowlanego. W zależności od odległości wentylatora od otworu drzwiowego (od 1 m do 7 m) i rodzaju wirnika (typu konwencjonalnego lub typu turbo) uzyskane wartości objętościowego natężenia przepływu wynoszą od 8591 m³/h do 15 656 m³/h. Wentylator z wirnikiem konwencjonalnym (2) charakteryzował się największą efektywnością wentylacji budynku w najmniejszej badanej odległości od otworu drzwiowego (1 m). Przy takim pozycjonowaniu wentylator przetłoczył 14 020 m³/h. Wraz ze wzrostem odległości od otworu drzwiowego do 7 m wartość ta malała aż do 8591 m³/h. Z kolei wentylator z wirnikiem typu turbo największą efektywność uzyskiwał w odległości 5 m od otworu drzwiowego. W tym obszarze wentylator przetłoczył 15 656 m³/h.

Ponadto wykonane badania potwierdziły, że zmiana powierzchni otworu wylotowego jest ważnym parametrem warunkującym skuteczność wentylacji. W zależności od warunków pożarowych panujących w obiekcie i zamiaru taktycznego ratownictwa, jaki został przyjęty przez dowodzącego akcją, należy dostosować powierzchnię otwarcia otworu wylotowego. W przypadku gdy zaistnieje konieczność zapewnienia warunków ewakuacji na drodze ewakuacyjnej (np. w obiekcie wielokondygnacyjnym) i produkty rozkładu termicznego rozproszą się wewnątrz takiego obiektu – wtedy pożądane będzie zapewnienie jak największego otworu wylotowego. Z drugiej strony, gdy w trakcie działań ratowniczych zaistnieje konieczność zabezpieczenia drogi ewakuacyjnej –

korzystniejsze będzie zmniejszenie powierzchni otworu wylotowego. Takie działanie pozwoli na wytworzenie nadciśnienia wewnątrz wentylowanej kubatury. Ponadto w wyniku prowadzonej analizy wykazano, że spadek ciśnienia wzdłuż drogi przepływu nie zależy od położenia wentylatora, lecz od konfiguracji geometrycznej budynku. Zaobserwowany spadek udziału oporów przepływu na otworze wylotowym wraz z rosnącym jego przekrojem świadczy o tym, że powiększanie rozmiaru otworu wylotowego ponad wielkość powierzchni występujących wewnątrz budynku przewężeń nie zwiększa znacząco efektywności wentylacji. Czynnikiem w większym stopniu warunkującym wówczas ilość przetłaczanego strumienia powietrza jest zapewnienie wolnego od przeszkód toru wymiany gazowej w wentylowanej kubaturze.

8. Porównanie metod badawczych i ich ograniczenia [A1, A3, A8]

Należy wskazać, że charakter badań w przypadku każdej metody (A, B i C) jest zróżnicowany. Dotyczy to zarówno budowy stanowisk badawczych oraz mechanizmów pomiarowych, jak i charakterystyki parametrów przepływu uzyskiwanych podczas badań z wykorzystaniem poszczególnych stanowisk testowych. Ponadto, w zależności od zastosowanej metody badawczej, zmianie ulegają również parametry jednostek napędowych oraz emisja gazów spalinowych.

8.1. Analiza porównawcza parametrów przepływu uzyskiwanych w wyniku badań z użyciem metod A, B i C

Metoda zgodna z PN-EN ISO 5801 (A) jest testem przeznaczonym do badań parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory osiowe lub promieniowe, które w warunkach nominalnych pracują w kanałach lub szachtach wentylacyjnych. Niemniej jednak, zgodnie z dokonaniem rozpoznaniem rynkowym, znaczna część producentów wentylatorów mobilnych (stosowanych przez jednostki ochrony przeciwpożarowej) stosuje właśnie tę metodę do oceny parametrów przepływu w przypadku konstruowanej jednostki. Jest to związane ze stosunkowo niskim kosztem wytworzenia stanowiska, czyli zakupu materiałów (rury, profile, króćce przyłączeniowe) oraz aparatury testowej (rurka Prandtla oraz przetworniki ciśnienia), co przekłada się na dużą dostępność usług i stanowisk badawczych na rynku. Zauważa się również, że z uwagi na niewielki gabaryt stanowiska (co umożliwia wykonywanie badań w pomieszczeniu zamkniętym) metoda jest mało podatna na wpływ warunków atmosferycznych, w tym na podmuchy wiatru czy zmiany temperatury, wilgotności i ciśnienia. Ponadto należy wskazać że metoda zgodna z PN-EN ISO 5801 stanowi powszechnie uznane, międzynarodowe podejście badawcze. Analizując ograniczenia tej metody podczas badań w kanałach rurowych, należy również wskazać że nie umożliwia ona określenia najważniejszych parametrów przepływu strugi powietrza wytwarzanej przez wentylatory mobilne, tj. charakterystyki profilu jej prędkości i zmiany jej rozkładu (w wolnym przepływie) oraz związanych z tym geometrycznych parametrów pozycjonowania (kąta nachylenia wirnika i odległości od otworu drzwiowego), w których mobilna jednostka pracuje najbardziej efektywnie. Podczas testów zgodnie z PN-EN ISO 5801 nie ma również możliwości określenia zdolności wentylatora do indukowania dodatkowych porcji powietrza z otoczenia, zassanych przez wygenerowaną strugę.

Metoda B – ocena charakterystyk profilu prędkości strugi powietrza wytwarzanej przez wentylatory mobilne, jest przeznaczona do badania wentylatorów mobilnych. Metoda

została zaproponowana przez National Institute of Standards and Technology. Pierwotna konfiguracja testowa została opisana w opracowaniu *Characterizing Positive Pressure Ventilation using Computational Fluid Dynamics* [22]. Za pomocą wskazanej metody można ocenić rozkład prędkości przepływu strugi powietrza generowanej przez wentylator mobilny w trzech wymiarach (długość, wysokość i szerokość). Funkcjonalność stanowiska umożliwia ocenę wielkości strumieni przepływu strugi powietrza generowanej przez wentylator mobilny z uwzględnieniem zmiennych parametrów testowych, tj. typów wentylatorów (o dowolnej wielkości wirnika), warunków pozycjonowania (odległości ustawienia i kąta nachylenia wirnika), obecności przeszkód itd. Aparatura zastosowana w ramach metody B umożliwia również dokonanie oceny rozkładu strugi prędkości w przekroju/płaszczyźnie dla różnych ustawień wentylatora. Dodatkowo metoda B pozwala również na wykonanie testów dla większej liczby jednostek wentylatorowych np. pracujących w tandemie lub w innych konfiguracjach. W ramach niniejszej pracy zostało stworzone stanowisko badawcze do oceny charakterystyk profilu prędkości strugi powietrza tłoczonej przez wentylator. W odróżnieniu od stanowiska badawczego stosowanego przez NIST, stanowisko utworzone w CNBOP-PIB charakteryzuje się możliwością wykonywania pomiarów w sposób automatyczny dzięki zastosowaniu modułu ze specjalną aplikacją komputerową oraz autonomicznego systemu transportu sondy (napędzanego silnikami krokowymi) na powierzchni płaszczyzny pomiarowej, który przemieszcza czujnik w ściśle zdefiniowane punkty. Metoda pierwotnie zaproponowana przez NIST opierała się na ręcznym pomiarze (z wykorzystaniem anemometru z odczytem przez operatora) w punktach sondowania zlokalizowanych na powierzchni płaszczyzny pomiarowej oznaczonej przez splecioną krzyżowo linkę mocowaną obwodowo do profili stalowych. Opisywana metoda jest mniej popularna od metody zgodnej z PN-EN ISO 5801, niemniej jednak jest również stosowana przez producentów mobilnych urządzeń wentylatorowych. Należy wspomnieć również o pewnych ograniczeniach metody B. Badania wykonywane są w wolnym przepływie z uwzględnieniem przeszkód, w tym przypadku makiety symulującej otwór drzwiowy, na której zlokalizowano płaszczyznę pomiarową bez kubatury (konstrukcji budynku) za otworem drzwiowym. Należy więc zauważyć, że metoda nie umożliwia oceny objętościowego natężenia przepływu powietrza w warunkach przeciwcisnienia, jakie nominalnie występuje w budynku i jest zmienne w zależności od jego konstrukcji oraz panujących w nim warunków. Na uwagę zasługuje też fakt, że aparatura jest również narażona na niekorzystny wpływ warunków atmosferycznych. W przypadku braku wielkogabarytowej hali badawczej prowadzenie badań w stabilnych, bezwietrznych warunkach z uwzględnieniem stałych parametrów środowiskowych może się okazać znacznie utrudnione lub niemożliwe.

Trzecim testem (metoda C) wpisanym w obszar niniejszego opracowania jest badanie parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne w rzeczywistych warunkach pracy, czyli w wielokondygnacyjnym obiekcie budowlanym. Tego typu testy są szeroko rozwijane w środowisku naukowym na całym świecie i skupiają się na ocenie parametrów przepływu z uwzględnieniem wentylatorów mobilnych wykorzystywanych w trakcie działań ratowniczych. Metoda ta jest również rozwijana przez Niemiecki Instytut Normalizacyjny (niem. DIN – *Deutsches Institut für Normung*), który opracował metodę oceny parametrów przepływu w wielokondygnacyjnym obiekcie budowlanym [34]. Rozpatrywane stanowisko badawcze, gdzie tor wymiany gazowej stanowi odcinek rzeczywistej klatki schodowej, wyposażone jest w przetworniki ciśnienia na każdej kondygnacji oraz w kryzę pomiarową do oceny wielkości strumienia przepływu na powierzchni otworu wylotowego. Taka konfiguracja testowa zapewnia uzyskanie wielu informacji na temat parametrów przepływu strugi powietrza generowanej przez wentylator mobilny. Zaletą stanowiska (podobnie jak w przypadku metody B) jest to, że umożliwia ono weryfikację parametrów przepływu w rzeczywistych warunkach pracy (wolny przepływ). Ponadto istnieje możliwość oszacowania strat ciśnienia w obiekcie spowodowanych występowaniem przeszkód na odcinku wymiany gazowej ze szczególnym uwzględnieniem przewężeń toru przepływowego (otwory w stropie klatki schodowej). Jako zaletę metody C należy wskazać możliwość testowania większej liczby jednostek wentylatorowych, pracujących w zestawach w różnych konfiguracjach. Należy również wspomnieć o pewnych ograniczeniach metody C. Ze względu na jej specyfikę (badania na stanowisku wielokubaturowym, w wielkiej skali, z pomiarem wartości objętościowego przepływu na powierzchni otworu okiennego) występuje silne narażenie na wpływ warunków atmosferycznych, a szczególnie wiatru, od którego zależy nie tylko odczyt wartości natężenia przepływu (na powierzchni otworu wylotowego) i ciśnienia (wewnątrz klatki schodowej), ale również wektor strugi powietrza wytwarzanej przez wentylator, napływającej na powierzchnię otworu drzwiowego.

Należy zauważyć duże różnice między wartościami parametrów (objętościowego natężenia przepływu i ciśnienia) uzyskiwanymi z użyciem metod A, B i C. W tabelach 3 i 4 zestawiono wartości parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne typu konwencjonalnego (2) i typu turbo (3). Maksymalne wartości objętościowego natężenia przepływu uzyskane z użyciem metody A były mniejsze ok. 15% (w przypadku wentylatora konwencjonalnego – 2) i o ok. 20% (w przypadku wentylatora typu turbo – 3) w porównaniu z wartościami uzyskanymi z zastosowaniem metody C. Z kolei wartości objętościowego natężenia przepływu uzyskane metodą B były w przypadku obu badanych jednostek (2 i 3) o ok. 134% większe od zarejestrowanych z użyciem metody C. Odnosząc się do wartości ciśnienia uzyskanego

w metodzie A – parametr ten był większy o ok. 232% (podczas badań wentylatora konwencjonalnego) i ok. 752% (w przypadku wentylatora typu turbo) w odniesieniu do wartości uzyskanych metodą C.

Analizując omawiane rozbieżności, należy zaznaczyć że w przypadku metody A (PN-EN ISO 5801) wentylator tłoczy strugę do przestrzeni zamkniętej ścianami (kanał przepływowy), w wyniku czego w tym obszarze może występować ciśnienie inne (przede wszystkim wyższe) niż ciśnienie otoczenia. To sprawia, że część jego pracy zmienia się bezpośrednio w pracę techniczną w znaczeniu termodynamicznym [16]. Taka zależność powoduje występowanie za wirnikiem ciśnienia wyższego niż na pozostałych stanowiskach testowych. Opisując różnicę między wartościami ciśnienia rejestrowanymi podczas stosowania metod A i C, należy wskazać, że metoda C nie umożliwia osiągnięcia tak wysokiego ciśnienia jak metoda A. Dzieje się tak, ponieważ w przypadku metody C tłoczenie strugi do wnętrza obiektu budowlanego odbywa się w wolnym przepływie, przy czym występuje mieszanie się strugi z powietrzem z otoczenia oraz spowalnianie strumienia, a otwór drzwiowy umożliwia lokalne cofanie się przepływu. Z drugiej jednak strony można zaobserwować pewną analogię między metodami A i C. Podczas badań w rzeczywistych obiektach budowlanych oraz na stanowisku zgodnym z PN-EN ISO 5801 uzyskuje się jedynie część charakterystyki przepływowej wentylatora i nigdy nie dochodzi się do jej prawego skraju. Dzieje się tak, ponieważ na stanowiskach służących do badań metodami A i C występują przeszkody na torze wymiany gazowej. W przypadku metody A przeszkodę stanowi sam kanał i znajdująca się w nim prostownica przepływu, a w przypadku metody C przeszkodami są schody, spoczniki a także przewężenia w otworach stropowych. Gdy wentylator pracuje w otoczeniu o stałym ciśnieniu (warunki odpowiadające metodzie B), wówczas jego praca najpierw zmienia się na wirniku w przyrost ciśnienia, a następnie (tuż za wirnikiem), zgodnie z równaniem Bernoullego, przekształca się w prędkość strumienia. Dzieje się tak, ponieważ otoczenie nie wymusza przeciwcisnienia. Praca w wolnym przepływie odpowiada zawsze pracy w prawej części charakterystyki wentylatora (maksymalne natężenie przepływu powietrza, minimalne ciśnienie tłoczenia). Jako najodpowiedniejszą metodę badania parametrów przepływu wentylatorów mobilnych należałoby faworyzować metodę C, ponieważ umożliwia ona uzyskanie najbardziej reprezentatywnych parametrów przepływu, odwzorowując wszystkie aspekty fizyczne warunków stosowania wentylatorów (m.in. praca w wolnym przepływie, możliwość indukowania dodatkowych porcji powietrza przez strugę oraz obecność oporów na drodze toru wymiany gazowej).

Tabela 3. Maksymalne wartości parametrów przepływu uzyskane w wyniku badań z użyciem metod A, B i C (wentylator konwencjonalny – 2)

Metoda A			Metoda B		Metoda C		
Konfiguracja testowa	Objętościowe natężenie przepływu [m ³ /h]	Ciśnienie [Pa]	Konfiguracja ustawienia wentylatora	Objętościowe natężenie przepływu [m ³ /h]	Konfiguracja ustawienia wentylatora	Objętościowe natężenie przepływu [m ³ /h]	Ciśnienie [Pa]
Metoda PN-EN ISO 5801 (przepustnica w pełni otwarta)	11 942	67,1	3 m, 11°	32 744	1 m, 17°	14 020	20,2

Tabela 4. Maksymalne wartości parametrów przepływu uzyskane w wyniku badań z użyciem metod A, B i C (wentylatora typu turbo – 3)

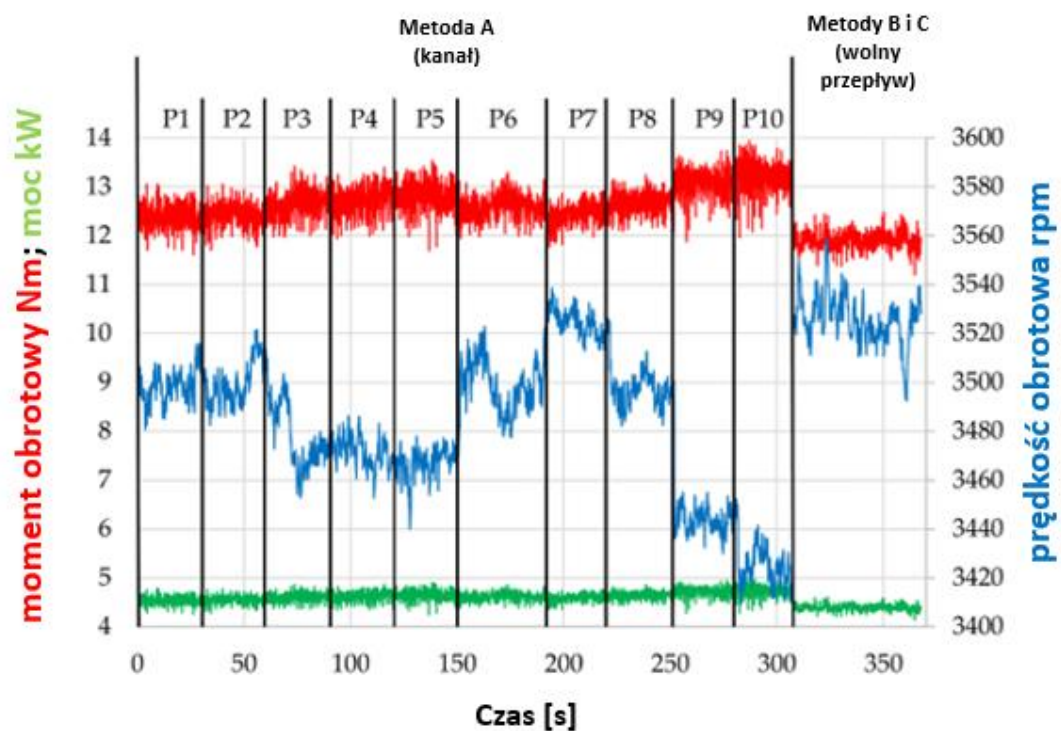
Metoda A			Metoda B		Metoda C		
Konfiguracja testowa	Objętościowe natężenie przepływu [m ³ /h]	Ciśnienie [Pa]	Konfiguracja ustawienia wentylatora	Objętościowe natężenie przepływu [m ³ /h]	Konfiguracja ustawienia wentylatora	Objętościowe natężenie przepływu [m ³ /h]	Ciśnienie [Pa]
Metoda PN-EN ISO 5801 (przepustnica w pełni otwarta)	12 530	-169,4	7 m, 6°	36 754	1 m, 17°	15 656	26,0

8.2. Analiza porównawcza parametrów pracy jednostek napędowych podczas badań z użyciem metod A, B i C.

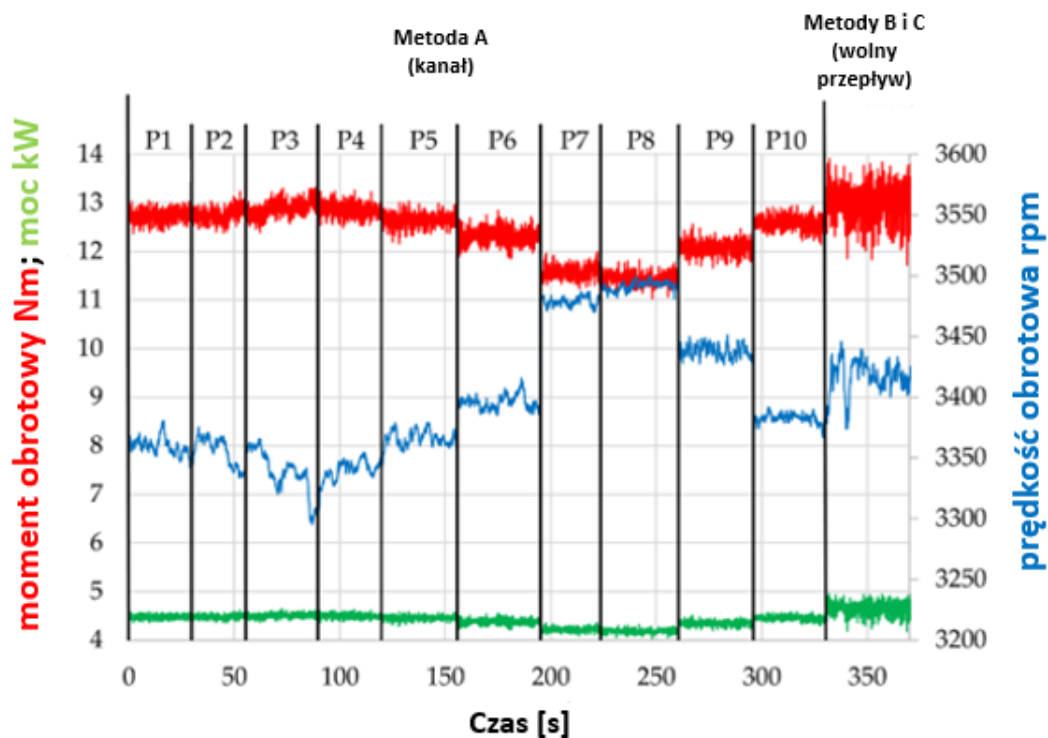
Analizując różnice między stosowanymi metodami badawczymi, należy wskazać, że w zależności od zastosowanej konfiguracji testowej zmianie ulegają również parametry jednostki napędowej, tj. prędkość obrotowa, moment obrotowy oraz moc. Szczegółowy opis metodyki badań parametrów jednostki napędowej został przedstawiony w [A3]. W trakcie badań rejestrowano wartości momentu obrotowego, prędkości obrotowej i mocy (rys. 28 i 29). Na tej podstawie wyznaczono średnie wartości badanych parametrów w zależności od warunków pracy, jakie stworzono w ramach omawianych postępowań badawczych (rys. 30 i 31).

Analiza wykazała, że praca jednostki w wolnym przepływie (metody B i C) umożliwia uzyskanie prędkości obrotowej większej o 0,7–1,7% (rys. 32.). Wynika to stąd, że wytwarzany strumień powietrza zostaje dynamicznie rozproszony w otoczeniu i turbulentnie zmieszany z powietrzem nagromadzonym w otwartej przestrzeni [17]. W trakcie badań zgodnych z PN-EN ISO 5801 (metoda A) wirnik dodatkowo ma do pokonania straty ciśnienia związane z przepływem przez kanał. W zależności od typu

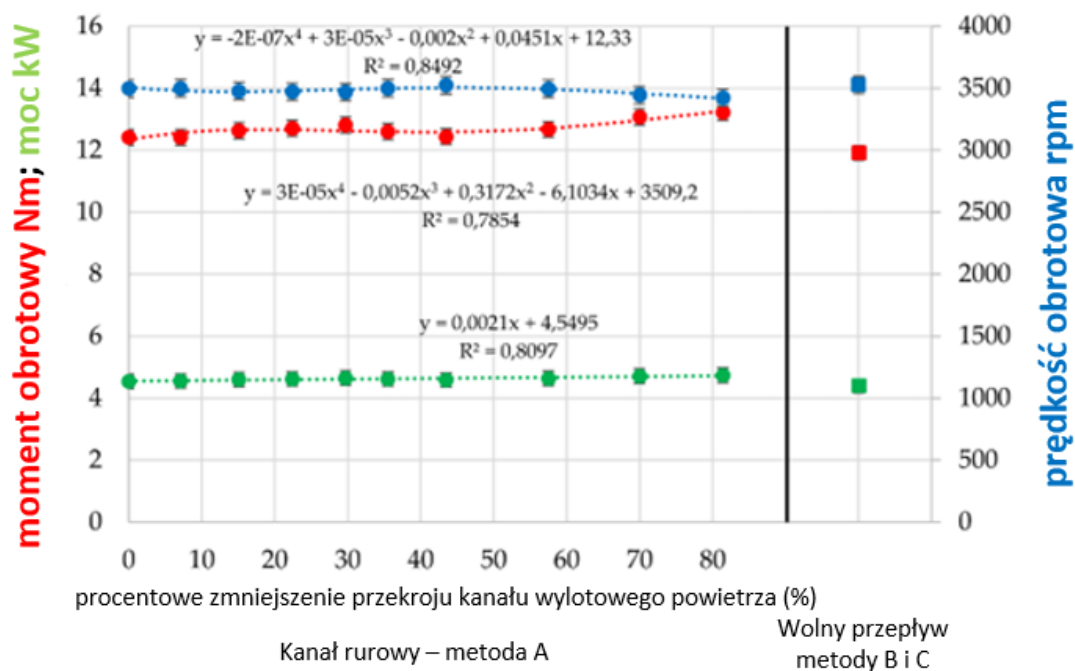
wentylatora i metody pomiaru wartość momentu obrotowego jednostki napędowej malała o 4% (wentylator 2) lub rosła o 2,4% (wentylator 3), podczas badań które odpowiadają warunkom pracy w przepływie otwartym (metody B i C). Podobną zależność można zaobserwować podczas pomiaru mocy. W przypadku wentylatora konwencjonalnego (wentylator 2) pomiar w warunkach badawczych bliższych rzeczywistym (przepływ otwarty) wykazuje mniejsze zapotrzebowanie na moc (o ok. 3,2%). Praca w takich warunkach (metody B i C – przepływ otwarty) będzie się przekładać na mniejsze zapotrzebowanie energetyczne urządzenia [35–36]. Praca pod mniejszym obciążeniem powoduje również mniejszą emisję zanieczyszczeń, gdyż jednostki spalinowe charakteryzują się większą emisją szkodliwych gazów spalinowych podczas pracy pod większym obciążeniem, czyli w tym przypadku przy pracy z większą mocą [37–38]. Wentylator typu turbo (wentylator 3) w warunkach otwartego przepływu charakteryzuje się wzrostem poboru mocy o 4,5%, co związane jest z charakterem generowanej przez niego strugi – przez wentylator płynie większy strumień masy (typowa cecha charakterystyki wentylatora) [16]. Uzyskane wyniki świadczą o tym, że metody badania wentylatorów mobilnych wpływają na wyniki pracy jednostek napędowych. Wykazano, że badania w kanale rurowym (metodą A) są korzystniejsze dla producentów wentylatorów konwencjonalnych (wentylator 2), gdyż w takich warunkach pomiaru wentylator pracuje pod mniejszym obciążeniem jednostki napędowej w porównaniu z wentylatorem typu turbo (wentylator 3). Różnice między wartościami parametrów jednostek napędowych badanych wentylatorów bez uwzględnienia metody badawczej mogą wynosić do ok. 7,7% (moc), 6,4% (moment obrotowy) i 2,4% (prędkość obrotowa). Jak wynika z przeprowadzonych badań, parametrem najmniej wrażliwym na rodzaj zastosowanej metody jest prędkość obrotowa. Podobne obserwacje poczynili również Fritsche i in. w 2018 r. [39], zauważając jednocześnie, że prędkość obrotowa zależy również od parametrów pracy jednostki napędowej, w szczególności od mocy przekazywanej z wału korbowego silnika na piastę wirnika wentylatora. Wyznaczenie warunków pracy jednostki napędowej, a głównie prędkości obrotowej i momentu obrotowego ma wpływ na dobór testu badawczego w ramach badań homologacyjnych Unii Europejskiej [40–42]. W procedurach testowania silników niedrogowych o zapłonie iskrowym (SI) przewiduje się dobór testu homologacyjnego do przyszłych warunków pracy urządzenia.



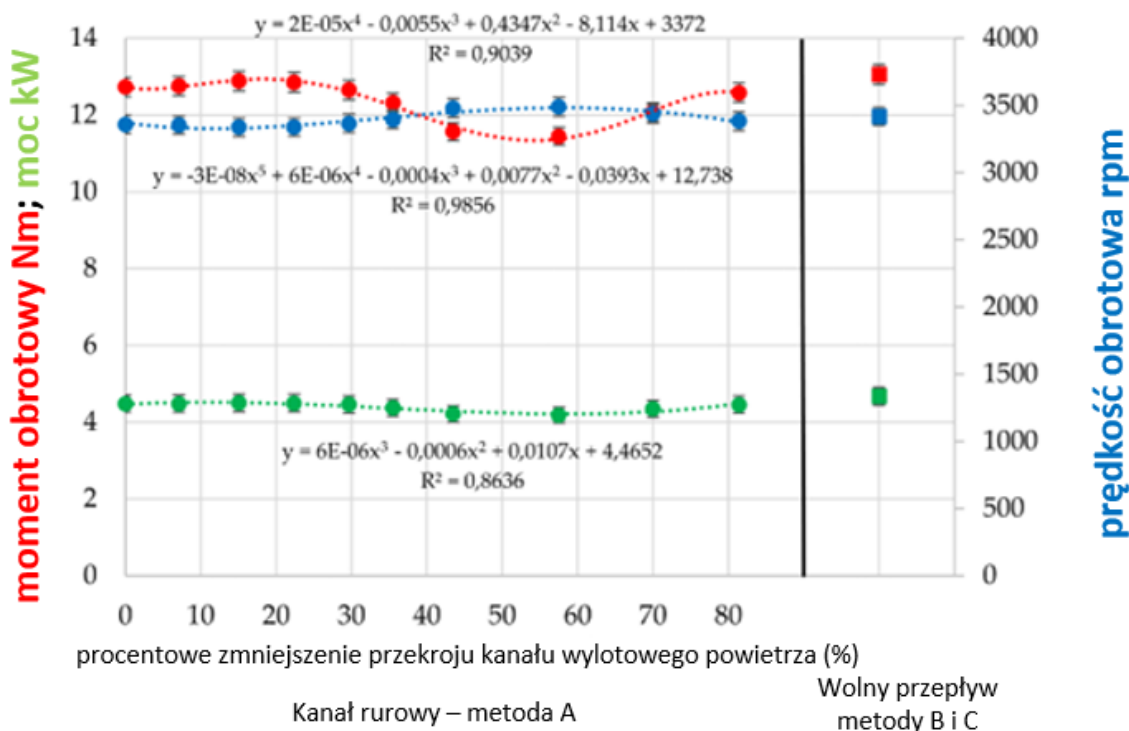
Rys. 28. Moc, moment obrotowy oraz prędkość obrotowa podczas badań wentylatora 2 metodą A (ze zmiennym przyknięciem przepustnicy) oraz metodami B i C



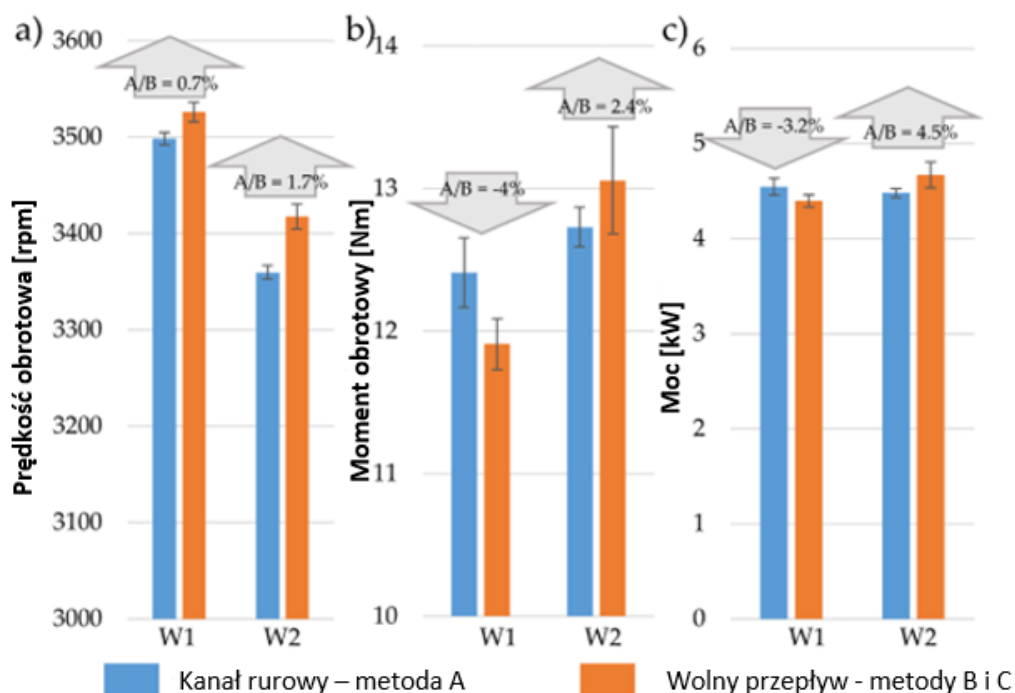
Rys. 29. Moc, moment obrotowy oraz prędkość obrotowa podczas badań wentylatora 3 metodą A (ze zmiennym przyknięciem przepustnicy) oraz metodami B i C



Rys. 30. Charakterystyka zmian średnich wartości mocy, momentu obrotowego oraz prędkości obrotowej podczas badań wentylatora 2 metodą A (ze zmiennym przymknięciem przepustnicy) oraz metodami B i C



Rys. 31. Charakterystyka zmian średnich wartości mocy, momentu obrotowego oraz prędkości obrotowej podczas badań wentylatora 3 metodą A (ze zmiennym przymknięciem przepustnicy) oraz metodami B i C



Rys. 32. Wpływ metody pomiaru na średnie wartości mocy, momentu obrotowego oraz prędkości obrotowej podczas badań metodą A (z otwartą przepustnicą) oraz metodami B i C); A/B – różnica między zmierzonymi wartościami w zależności od metody pomiaru (A – metoda A; B – metody odpowiadające warunkom pracy w wolnym przepływie, tj. B i C)

8.3. Analiza porównawcza emisji gazów spalinowych przez jednostki napędowe wentylatorów mobilnych podczas badań z użyciem metod A, B i C

Porównując wyniki zastosowania metod badawczych (A, B i C) należy wskazać, że w zależności od zastosowanej konfiguracji testowej zmianie ulega również emisja spalin wytwarzanych przez silnik jednostki napędowej. Szczegółowy opis metody badania wartości emisji spalin przedstawiono w [A8]. Na podstawie wykonanych badań parametrów jednostki napędowej (opisanych w podrozdziale 8.2) i z użyciem algorytmów obliczeniowych systemu PEMS (z uwzględnieniem zmiennych metod pomiaru) wyznaczono zużycie paliwa (rys. 33) oraz emisję CO₂ (rys. 34), CO (rys. 35), HC (rys. 36) i NO_x (rys. 37). Zmiany warunków pracy jednostki napędowej (prędkości obrotowej, momentu obrotowego i mocy) wywołane zmianą metody pomiaru objętości strumienia przepływu są obserwowane na podstawie zużycia paliwa i emisji szkodliwych związków spalin. Zużycie paliwa w przypadku wentylatorów z wirnikiem konwencjonalnym (2) jest identyczne niezależnie od metody pomiaru strumienia przepływu (różnica w wynikach:

ok. 0,65%). Z kolei wentylatory typu turbo podczas badań metodą A (PN-EN ISO 5801) charakteryzują się większym zużyciem paliwa o 9,8%. Jest to zgodne z charakterystyką silników spalinowych, które wraz ze wzrostem obciążenia lub podczas pracy z większą mocą charakteryzują się większym zużyciem paliwa [43–44]. Taka charakterystyka pracy silników małej mocy z zapłonem iskrowym jest dostrzegana również w innych zastosowaniach [45]. Do podwyższonego zużycia paliwa mogą przyczynić się również zaburzenia w sterowaniu mieszanką paliwowo-powietrzną, co związane jest zmianą warunków pracy (zmiana metody pomiaru parametrów przepływu powietrza).

Emisja CO₂ jest silnie zależna od zużycia paliwa i występuje tylko przy całkowitym spalaniu mieszanki. W przypadku wentylatora z wirnikiem konwencjonalnym (2) zmiana metody pomiaru nie wpływa na wartość emisji CO₂ a w przypadku wentylatorów typu turbo (3) metoda A powoduje redukcję emisji CO₂ o około 2,4%. Zauważyć można, że trend redukcji zużycia paliwa i redukcji CO₂ dla wentylatora typu turbo nie jest zbieżny z ogólnymi zasadami redukcji zużycia paliwa i emisji spalin CO₂. Jednak obserwując również emisję CO, HC i NO_x można wysunąć wnioski, że praca wentylatora typu turbo (3) podczas badań metodą A charakteryzuje się dużym zubożaniem sterowania dawkowaniem mieszanki paliwowo-powietrznej, co przejawia się podwyższoną emisją CO, HC i obniżoną emisją NO_x. Świadczy to o pracy na mieszankach paliwowo-powietrznych wzbogaconych. Przy porównywalnej emisji CO₂ podczas badania wentylatora typu turbo metodami A i B/C podwyższone zużycie paliwa podczas badania w warunkach metodą A, jest wynikiem niecałkowitego spalania paliwa w bogatej mieszance paliwowo-powietrznej (podwyższona emisja CO i HC). Obserwacja braku wzrostu obciążenia silnika (momentu obrotowego i mocy rys. 32) w tych warunkach pracy wskazuje, że przyczyną podwyższonego zużycia paliwa nie jest większe obciążenie, a problemy ze sterowaniem mieszanką paliwowo powietrzną w tych warunkach pracy.

Podczas analizy pod kątem emisji gazów cieplarnianych, do których jako jeden z podstawowych jest zaliczany dwutlenek węgla (CO₂), metoda A jest korzystniejsza dla wentylatorów typu turbo (3). Jednak zmiany wartości emisji CO₂ w zależności od stosowanej metody pomiaru są niewielkie.

Emisja CO jest wynikiem niecałkowitego spalania paliwa. Podczas badań z użyciem metody A odnotowano redukcję emisji CO o 1,7% w przypadku wentylatorów konwencjonalnych (2) oraz wzrost emisji o 67% w przypadku wentylatorów turbo (3). Należy wskazać, że obciążenie wirnika wentylatora typu turbo w kanale przepływowym powoduje zaburzenia w sterowaniu mieszanką paliwowo-powietrzną, co przyczynia się do znaczącego zwiększenia emisji CO, która jest nieunikniona w przypadku w silników

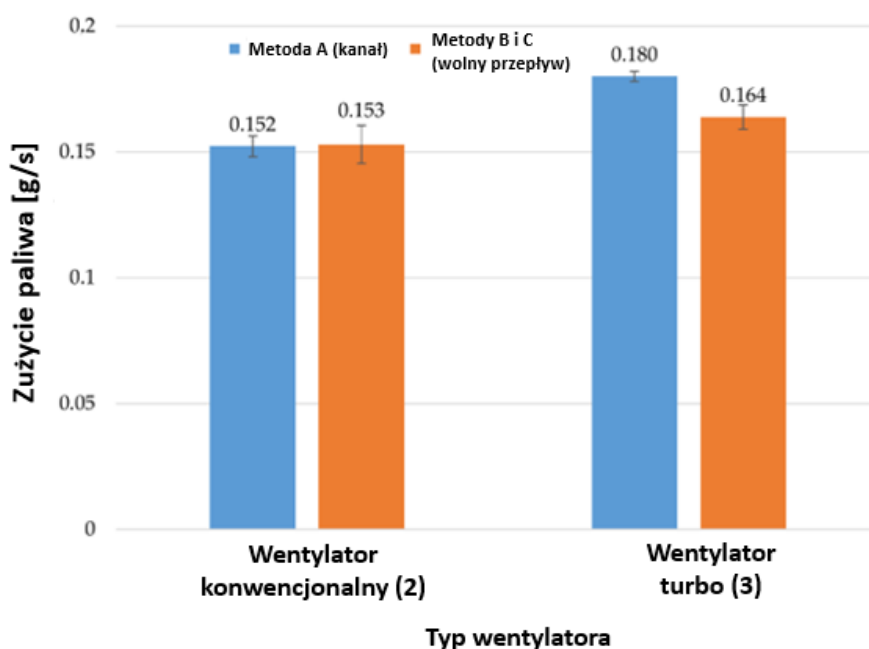
spalinowych, ponieważ komora spalania nigdy nie pozwala na całkowite spalenie węgla. Obserwując również wzrost emisji HC i redukcję emisji NO_x , można zakładać, że mieszanka jest bogata. Wynika to stąd, że warunki pracy silnika są odciążone, a proces sterowania mieszanką paliwowo-powietrzną nie uwzględnia tego parametru, dawkując paliwo zgodnie z założeniem większego obciążenia przy zadanej prędkości obrotowej. Można przyjąć, że proces regulacji składu mieszanki paliwowo-powietrznej w przypadku silników z wentylatorem typu turbo i z wentylatorem konwencjonalnym odbywa się w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, czyli zgodnych z metodą *open flow* (metody B i C).

Emisja HC spowodowana jest obecnością niespalonych cząstek paliwa w spalinach i wskazuje na pracę z mieszanką bogatą. Podczas badań z użyciem metody A, w przypadku wentylatora konwencjonalnego (2) odnotowano redukcję emisji HC o 5,2%, a w przypadku wentylatora typu turbo (3) wzrost emisji o 93,2%. Jest to potwierdzeniem wyników analizy problemu sterowania mieszanką paliwowo-powietrzną podczas pracy wentylatora typu turbo w warunkach metody A (PN-EN ISO 5801). Podobne były wyniki badania emisji NO_x , która jest skutkiem wysokiej temperatury spalania i występowania wolnych cząstek tlenu charakterystycznych dla mieszanek ubogich, czyli z przewagą powietrza nad paliwem w porównaniu z mieszanką stechiometryczną. Podczas badań z użyciem metody A odnotowano w przypadku wentylatora konwencjonalnego wzrost emisji NO_x o 4,8%, a w przypadku wentylatora typu turbo redukcję emisji NO_x o 37%. W przypadku wentylatorów z wirnikiem konwencjonalnym podczas stosowania tej metody dostrzec można pracę jednostki napędowej na mieszankach lekko zubożonych.

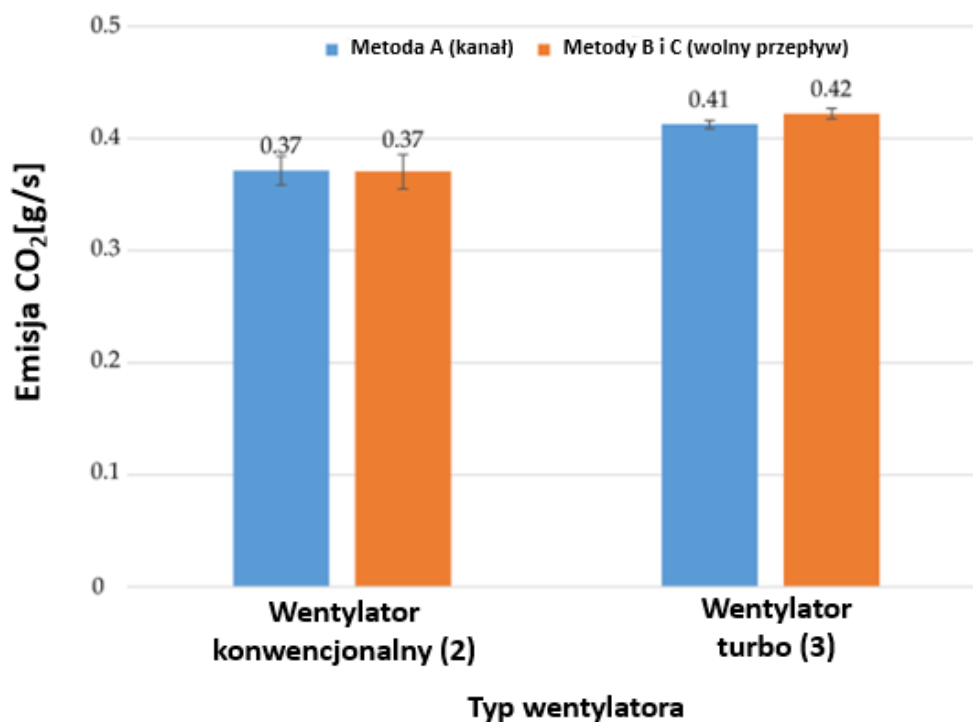
Należy zauważyć, że wirniki konwencjonalne (2) mniej niż wirniki typu turbo (3) oddziałują na jednostkę napędową podczas testów badawczych z użyciem rozpatrywanych metod (A, B i C). Przekłada to się na mniejsze zaburzenia w procesie sterowania mieszanką paliwowo-powietrzną (ze szczególnym uwzględnieniem metody A – *duct flow*). Odnotowano następujące wartości emisji składników spalin w badanych silnikach o mocy około 4,2 kW: CO_2 – od 0,37 g/s do 0,42 g/s, CO – od 60,1 mg/s do 100,2 mg/s, HC – od 0,72 mg/s do 1,41 mg/s oraz NO_x – od 1,65 mg/s do 2,62 mg/s. Jest to zbieżne z wynikami uzyskanymi przez innych naukowców dla badanych silników o podobnej mocy [46–47].

Obserwacje emisji spalin i wykazanie, że wentylator typu turbo (3) charakteryzuje się znacznymi zaburzeniami mieszanki paliwowo-powietrznej (praca na mieszance bogatej) podczas badań metodą A, prowadzą do stwierdzenia, że brak dostosowania układu zasilania paliwem powoduje podwyższenie wartości parametrów zanieczyszczenia powietrza podczas pracy urządzenia. Dodatkowo niewłaściwy dobór mieszanki

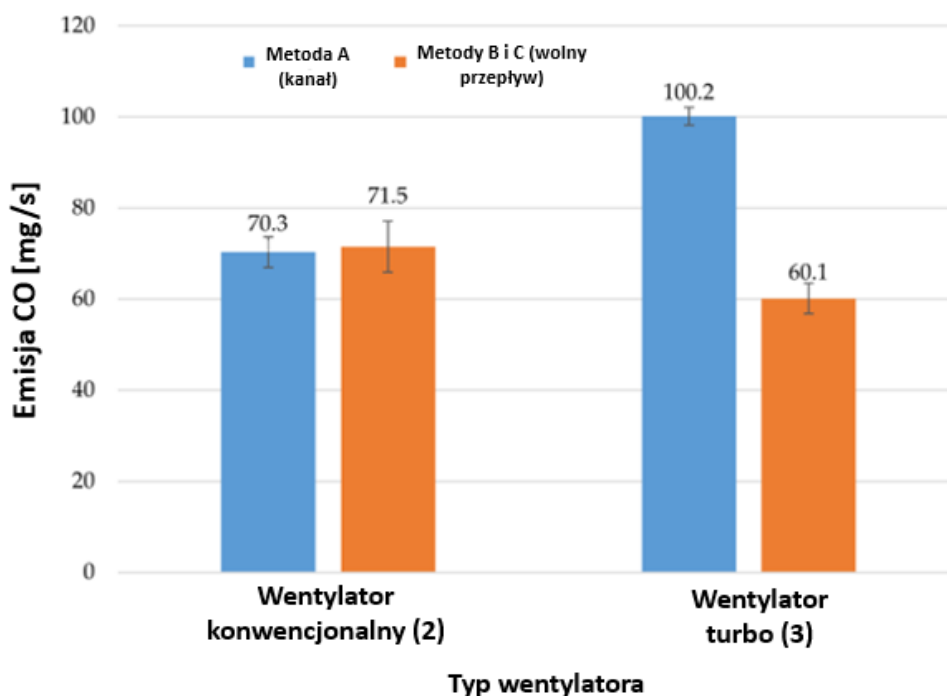
paliwowo-powietrznej w tych warunkach może się przyczyniać do zmniejszenia mocy jednostki napędowej, a przez to wartość natężenia przepływu generowanego przez wentylator również może być mniejsza. Wynika stąd ponownie wniosek, że z użyciem metody A uzyskuje się gorsze odwzorowanie rzeczywistych warunków pracy w porównaniu z metodami stosowanymi w wolnym przepływie (B i C) oraz nie zapewnia się obiektywnej oceny parametrów przepływu i parametrów eksploatacyjnych wentylatorów mobilnych. Pracę wentylatorów typu turbo w warunkach pomiaru parametrów przepływu metodą A może poprawić układ zasilania jednostki napędowej. Obecnie na rynku europejskim dominują silniki niedrogowe małej mocy z zapłonem iskrowym (SI), których układy zasilania są oparte na gaźnikach i których precyzja sterowania dawką paliwa i jej doбором jest znacznie ograniczona [48]. Innym równie ważnym sposobem wyznaczania charakterystyki warunków pracy badanych wentylatorów są europejskie testy homologacyjne silników spalinowych. Określenie warunków pracy zespołu napędowego, głównie prędkości obrotowej i momentu obrotowego, jest istotne przy doborze sposobu badań homologacyjnych zespołów napędowych Unii Europejskiej [40, 48]. W procedurach badania małych silników z zapłonem iskrowym nieporuszających się po drogach (SI) przewiduje się dobór badania homologacyjnego do warunków eksploatacyjnych, w których sprzęt będzie wykorzystywany.



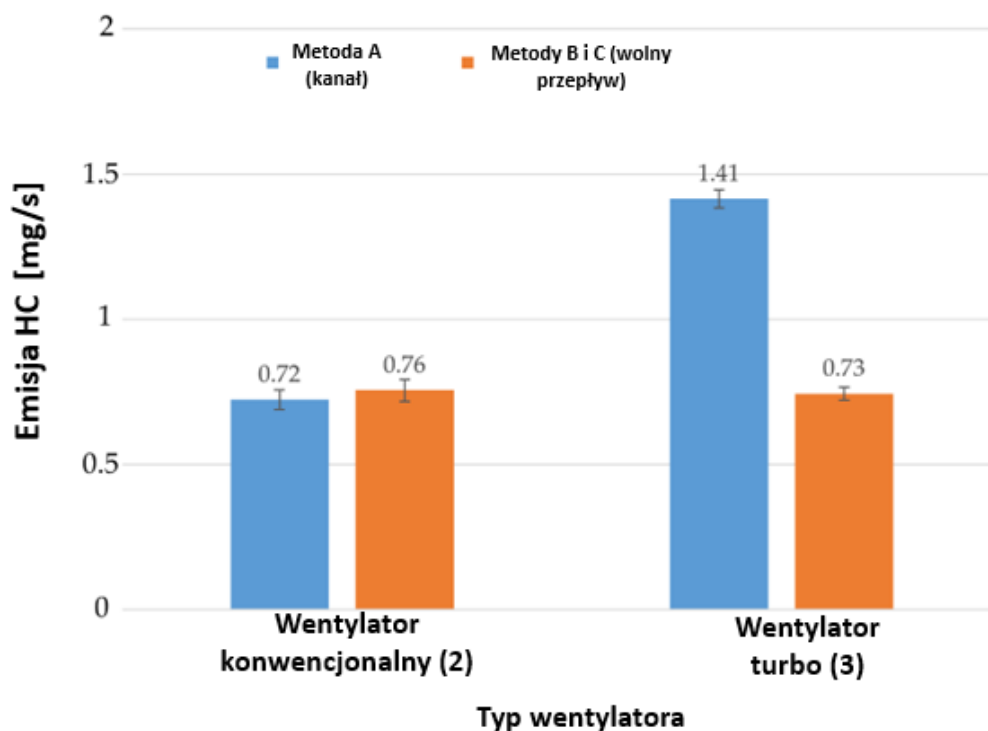
Rys. 33. Wartość zużycia paliwa podczas badań wentylatora konwencjonalnego (2) i wentylatora typu turbo (3) metodą A (w kanale) oraz metodami B i C (w wolnym przepływie)



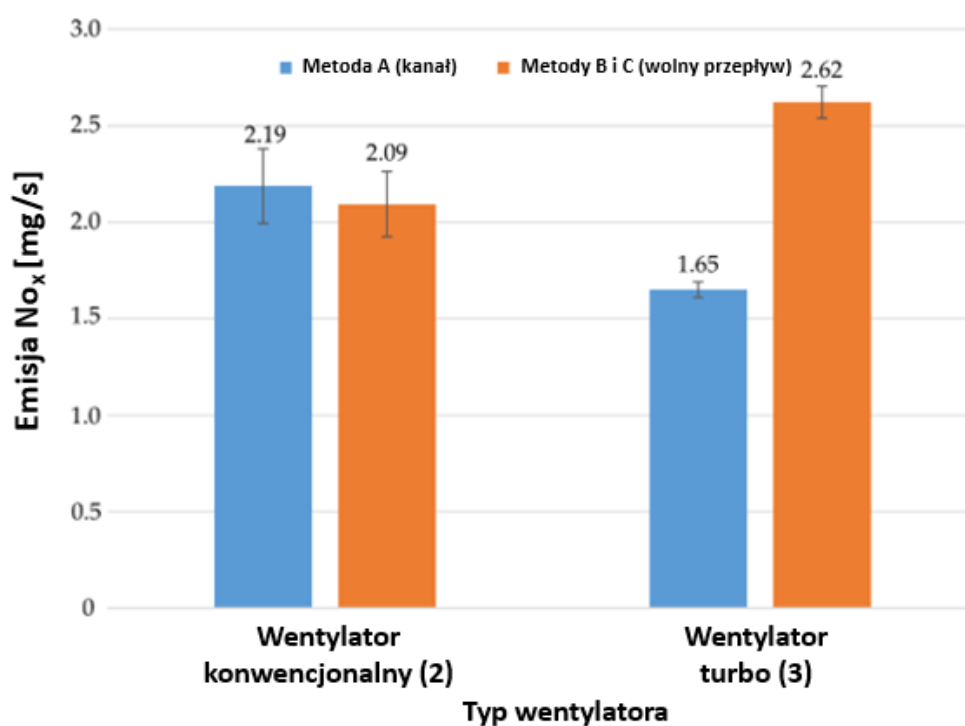
Rys. 34. Emisja CO₂ podczas badań wentylatora konwencjonalnego (2) i wentylatora typu turbo (3) metodą A (w kanale) oraz metodami B i C (w wolnym przepływie)



Rys. 35. Emisja CO podczas badań wentylatora konwencjonalnego (2) i wentylatora typu turbo (3) metodą A (w kanale) oraz metodami B i C (w wolnym przepływie)



Rys. 36. Emisja HC podczas badań wentylatora konwencjonalnego (2) i wentylatora typu turbo (3) metodą A (w kanale) oraz metodami B i C (w wolnym przepływie)



Rys. 37. Emisja NO_x podczas badań metodą A (w kanale) i B, C (w wolnym przepływie), wentylatora typu konwencjonalnego (2) i typu turbo (3).

Podsumowując wykonaną analizę należy wskazać, że zastosowana metoda badawcza (A, B lub C) wpływa nie tylko na uzyskane wartości parametrów przepływu, ale również na parametry pracy jednostki napędowej oraz na wartości emisji toksycznych produktów gazów spalinowych. Różnice pomiędzy wartościami objętościowego natężenia przepływu z użyciem metody A (w zależności od zastosowanego wentylatora) były mniejsze od 14 % do 20 % w porównaniu z wartościami uzyskanymi w metodzie C. Z kolei wartość objętościowego natężenia przepływu uzyskanego metodą B była większa (w przypadku obu typu jednostek wentylatorowych) o ok. 134% od wartości zarejestrowanych metodą C. Natomiast wartość ciśnienia w metodzie A była większą o 232% (wentylator konwencjonalny) i ok. 752% (wentylator typu turbo) w odniesieniu do wartości uzyskanych metodą C. Rozbieżności te związane są z konfiguracją stanowisk testowych (w tym toru wymiany gazowej, przez który przetłaczana jest struga). Podczas badań metodą A wentylator tłoczy strugę do przestrzeni zamkniętej, czemu towarzyszy brak turbulentnego mieszania z powietrzem z otoczenia. Uniemożliwia to pobranie dodatkowego powietrza z otoczenia zasilającego strumień przetłaczany bezpośrednio przez wentylator. Tłoczenie do zamkniętej przestrzeni dodatkowo pozwala na występowanie w niej nadciśnienia względem otoczenia. Tak więc w przypadku metody A odnotowuje się wyższe wartości ciśnienia tłoczenia, lecz mniejsze maksymalne wartości natężenia przepływu. W przypadku metod stosowanych w warunkach wolnego przepływu (np. metoda B) wentylator pracuje w otoczeniu, które nie wymusza przeciwcisnienia, dlatego jego praca jest natychmiast zamieniana na energię kinetyczną strumienia, który wytwarza. Należy wskazać też, że warunki pracy wynikające z zastosowanej metody pomiarowej wpływają też na parametry jednostki napędowej, takie jak: prędkość obrotowa, moment obrotowy oraz moc. Wpływ zmiany warunków pracy wynikający ze zmiany metody badań może powodować zmiany wyników badania parametrów jednostki napędowej: od 0,7% do 1,7% (prędkość obrotowa), od 2,4% do 4% (moment obrotowy) od 3,2% do 4,5% (moc na wale napędowym). Od tych parametrów zależy zużycie paliwa oraz emisja szkodliwych gazów spalinowych. Porównując wyniki badań wentylatorów konwencjonalnych metodą A z wynikami badań metodami B i C, zauważa się, że z użyciem metody A odnotowano redukcję emisji CO o 1,7% i HC o 5,2% oraz wzrost emisji NO_x o 4,8%. Zmienne warunki badania w przypadku wentylatorów konwencjonalnych nie wpływają znacząco na emisję CO₂ oraz na zużycie paliwa. W wyniku badań wentylatorów z wirnikiem typu turbo (3) zauważyć można większe różnice tj. redukcję emisji CO₂ o 2,4% i NO_x o 37%, wzrost emisji CO o 67% i HC o 93,2% oraz nieznaczny wpływ na zużycie paliwa. Przedstawione wyniki świadczą o tym, że przy ocenie parametrów eksploatacyjnych wentylatorów mobilnych, takich jak zużycie paliwa czy emisja szkodliwych spalin, ważne jest

uwzględnienie warunków pracy wentylatora, czyli konfiguracji testowej: kanał rurowy (metoda A) lub przepływ otwarty (metody B i C).

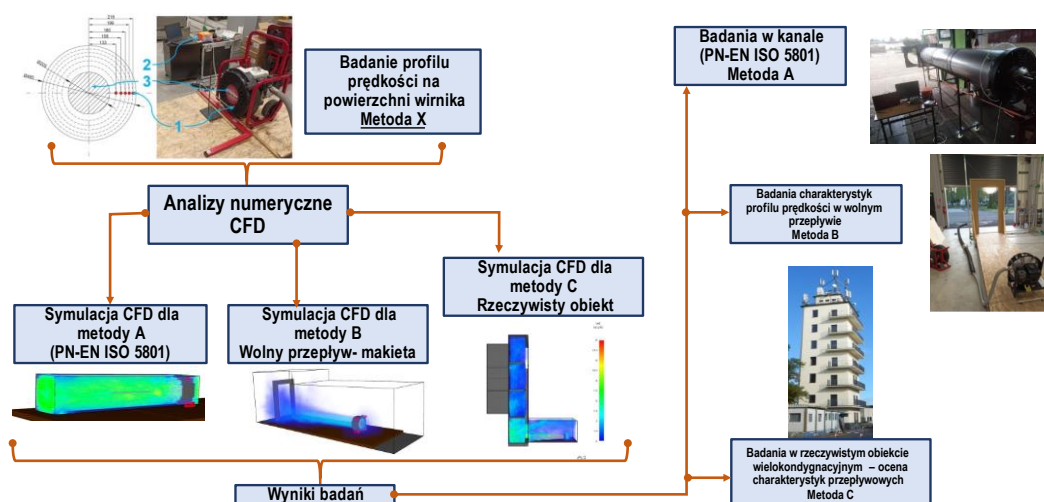
Na różnych etapach badań do analizy składu gazów spalinowych wykorzystywano stacjonarny analizator spalin CAPELEC CAP 3201 (który charakteryzuje się niskim kosztem eksploatacji i zarazem brakiem możliwości rejestracji wyników badań do pliku – możliwy jest tylko odczyt na wyświetlaczu). Urządzenie było stosowane przede wszystkim do badań pilotażowych, regulacyjnych i rozpoznających relację między zachodzącymi zjawiskami. Natomiast główne testy prowadzono z wykorzystaniem analizatora Axion R/S+, udostępnianym przez Instytut Napędów i Lotnictwa, na Wydziale Inżynierii Lądowej i Transportu, Politechniki Poznańskiej. Część badań dotyczących analizy składu spalin nie jest ujęta w zestawieniu publikacji naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej (ale były realizowane w trakcie jej trwania), ze względu na opóźnienia wydawnicze. Publikacje te podkreślają szerokie zainteresowania doktoranta również tą tematyką [49-50].

9. Hybrydowa metoda oceny parametrów przepływu w badaniach eksperymentalnych – metod A, B i C [A13]

Hybrydowa metoda oceny parametrów przepływu wytwarzanych przez wentylatory mobilne (połączenie badań w małej skali i programu CFD) pozwala na ocenę objętościowego natężenia przepływu i ciśnienia z zastosowaniem trzech metod badawczych; są to:

- A. badanie zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5801,
- B. badanie charakterystyk profilu prędkości w wolnym przepływie – test opracowany przez „National Institute of Standards and Technology”,
- C. badania parametrów przepływu w rzeczywistym obiekcie budowlanym.

Schemat przedstawiający algorytm działania metody hybrydowej został przedstawiony na rys. 38.



Rys. 38. Schemat obrazujący algorytm działania hybrydowej metody badawczej służącej do oceny parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne

Pierwszym krokiem związanym z implementacją omawianej metody hybrydowej są badania pola prędkości przepływu w bezpośrednim obszarze wirnika wentylatora (metoda X). Pomiar ten wykonywany jest w oparciu o standard ISO 5221 [18]. Oznaczanie punktów pomiarowych na okrągłej płaszczyźnie zabudowy wirnika odbywa się według zmodyfikowanej metody Log-Czebyszewa opisanej w standardzie ISO 5221 [18, 51]. Modyfikacja metody standardowej polega na wyodrębnieniu powierzchni martwej na wirniku jednostki wentylatorowej (zaślepki na piaście wentylatora mobilnego). Na wskazanej płaszczyźnie nie dokonuje się pomiaru pola prędkości przepływu oraz nie

uwzględnia się jej podczas wykonywania obliczeń objętościowego natężenia przepływu. W celu wskazania punktów sondowania do pomiaru pola prędkości na powierzchni wirnika wentylatora r_z opracowano następujące równanie (3):

$$r_z = \sqrt{r_d^2 - z \left(\frac{r_d^2 - r_m^2}{N} \right)} \quad (3)$$

gdzie:

r_d – promień średnicy wirnika wentylatora (liczony od krawędzi wirnika do środka zaślepki/piasty) [mm],

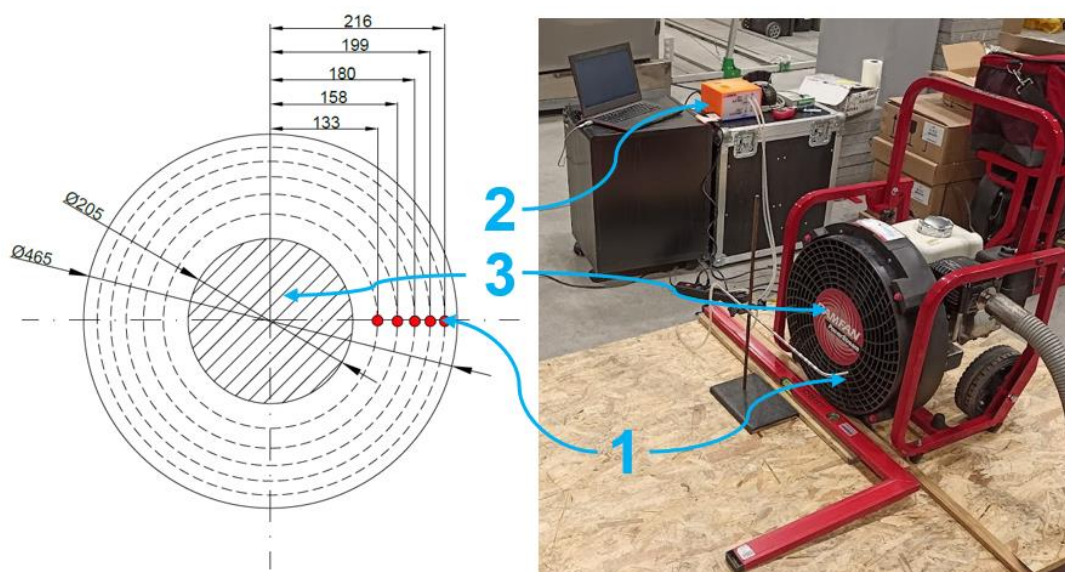
r_m – promień pustej płaszczyzny na powierzchni wirnika wentylatora (piasty) [mm],

z – numer kolejnego promienia zwymiarowanego względem środka przekroju [-],

N – liczba obszarów (pierścieni), na które podzielona została powierzchnia wirnika wentylatora w obszarze których wyznaczono punkty ciśnienia dynamicznego [-].

Przykładową lokalizację punktów pomiarowych wyznaczonych na podstawie równania (3) oraz wizualizację konfiguracji do badania profilu prędkości przepływu dla wentylatora GX 350 (wentylator 3), przedstawiono na rys. 39. Na potrzeby przedmiotowych testów wykorzystano następujące wyposażenie pomiarowe:

- rurkę Prandtla wykonaną zgodnie z wymaganiami standardu ANSI/AMCA 210-16 [52],
- przetworniki ciśnienia Setra 265 o zakresie pomiarowym 0-1245 Pa i dokładności 0,25%,
- system akwizycji „dataq instruments” (karta DI-710-UL 0-10V),
- narzędzia pomocnicze (kątomierz, suwmiarka, przymiar wstęgowy oraz statyw do stabilizacji rurki Prandtla).



Rys. 39. Konfiguracja badawcza do oceny pola prędkości przepływu w bezpośrednim obszarze wirnika wentylatora (o powierzchni całkowitej 0,17 m²); 1 – punkt pomiaru ciśnienia dynamicznego wytwarzanego przez wentylator GX 350; 2 – przetwornik wartości ciśnienia Setra 265, 3 – piasta na osi wirnika (martwe pole przepływu)

Badania pola prędkości metodą X należy prowadzić w układzie symetrycznym (po obu stronach wirnika) dla dwóch odległości pozycjonowania sondy (rurki Prandtla), czyli 50 mm i 100 mm przed powierzchnią wirnika. Badania powinny być wykonywane w zamkniętej kubaturze hali badawczej z zapewnieniem stabilnych warunków środowiskowych. Objętościowe natężenie przepływu określone jest na podstawie iloczynu średnich wartości ciśnienia dynamicznego (przeliczanych na prędkość) strugi powietrza (w wyznaczonych punktach sondowania) i powierzchni wirnika pomniejszonej o płaszczyznę piasty (czyli 0,14 m²) – równanie (3).

$$Q = V \cdot S_w \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} = \frac{\text{m}}{\text{h}} \cdot \text{m}^2 \right] \quad (4)$$

gdzie:

V – średnia wartość prędkości przepływu strugi powietrza generowanej przez wentylator mobilny [m/s],

S_w – powierzchnia wirnika wentylatora (pomniejszona o powierzchnię zaślepki na piastie wirnika) [m²].

Wyniki badania pola prędkości strugi powietrza na powierzchni wirnika zostały przedstawione w tabelach 5 i 6, a wartości objętościowego natężenia przepływu,

określone na podstawie prędkości przepływu, zaprezentowano w tabeli 7. W wyniku badań wykazano, że wentylator GX 350 (pomiar na dystansie 50 mm) uzyskał największą prędkość przepływu powietrza 34,42 m/s; najmniejsza zarejestrowana wartość wynosiła 6,0 m/s. Na dystansie 100 mm odnotowano wartości od 6,05 m/s do 31,95 m/s. W wyniku obliczeń objętościowego natężenia przepływu wykazano, że wentylator wytworzył przepływ o wartości 12 541 m³/h (± 404 m³/h) na dystansie 50 mm oraz o wartości 12 482 m³/h (± 314 m³/h) na dystansie 100 mm. Mahalingam z zespołem (2010) odnotował podobną wartość prędkości przepływu (17,9 m/s) i natężenie przepływu o wartości 23,900 m³/h [53].

Tabela 5. Prędkość przepływu strugi powietrza wytwarzanej przez wentylator, zmierzona przy powierzchni wirnika na dystansie 50 mm (AVG – średnia arytmetyczna natężenia przepływu, SD – odchylenie standardowe przyjmowane za błąd pomiaru)

Lokalizacja punktów pomiarowych	Wartość prędkości przepływu powietrza w wyznaczonych miejscach sondowania (dystans 50 mm) [m/s]									
	± 216		± 199		± 180		± 158		± 133	
	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD
Lewa strona	6,00	1,48	22,81	0,71	28,18	0,36	27,84	0,98	34,42	0,70
Prawa strona	11,43	0,95	28,61	1,36	33,10	0,44	29,91	0,39	26,52	0,65

Tabela 6. Prędkość przepływu strugi powietrza wytwarzanej przez wentylator, zmierzona przy powierzchni wirnika na dystansie 100 mm (AVG – średnia arytmetyczna natężenia przepływu, SD – odchylenie standardowe przyjmowane za błąd pomiaru)

Lokalizacja punktów pomiarowych	Wartość prędkości przepływu powietrza w wyznaczonych miejscach sondowania (dystans 100 mm) [m/s]									
	± 216		± 199		± 180		± 158		± 133	
	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD
Lewa strona	6,05	1,19	18,48	0,85	28,91	0,50	31,06	0,36	30,61	0,51
Prawa strona	13,89	0,74	23,41	0,54	31,95	0,42	31,74	0,39	31,56	0,73

Tabela 7. Wartość objętościowego strumienia przepływu wytwarzanego przez wentylator 2 (GX 350), zmierzona przy powierzchni wirnika na dystansach 50 mm i 100 mm (*AVG* – średnia arytmetyczna natężenia przepływu, *SD* – odchylenie standardowe przyjmowane za błąd pomiaru)

Dystans pomiaru [mm]	Objętościowe natężenie przepływu [m ³ /h]	
	<i>AVG</i>	<i>SD</i>
50	12 541	404
100	12 482	314

Uzyskane parametry objętościowego natężenia przepływu (tabela 7), zmierzone i obliczone zgodnie z przedstawionym wyżej algorytmem, stanowią zbiór miarodajnych informacji które są wprowadzane do modelu symulacji numerycznej CFD w programie Fire Dynamics Simulator. Wymagania dotyczące prowadzenia symulacji CFD w ramach oceny parametrów przepływu dla metod A, B i C przedstawiono w rozdziale 10.

10. Symulacje CFD metod badawczych pomiaru parametrów przepływu w ramach hybrydowej metody pomiaru [A4, A13]

Analizę numeryczną przeprowadzono z użyciem programu FDS (wersja 6.7.9), który stanowi pakiet oprogramowania CFD o otwartym kodzie źródłowym, przeznaczony do modelowania przepływów turbulentnych o małych prędkościach metodą dużych wirów (ang. *Large Eddy Simulation* LES). Program został opracowany przez Narodowy Instytut Standardów i Technologii (NIST) [54]. Jest to narzędzie, które rozwiązuje równania LES (przestrzenne równania Naviera-Stokesa), aby bezpośrednio rozwiązać duże turbulentne skale, które są odpowiedzialne za większość turbulentnego transportu masy i pędu. To podejście jest szczególnie odpowiednie w przypadku przepływów zdominowanych siłami wyporu oraz przepływów oderwanych (w tym przepływów swobodnych).

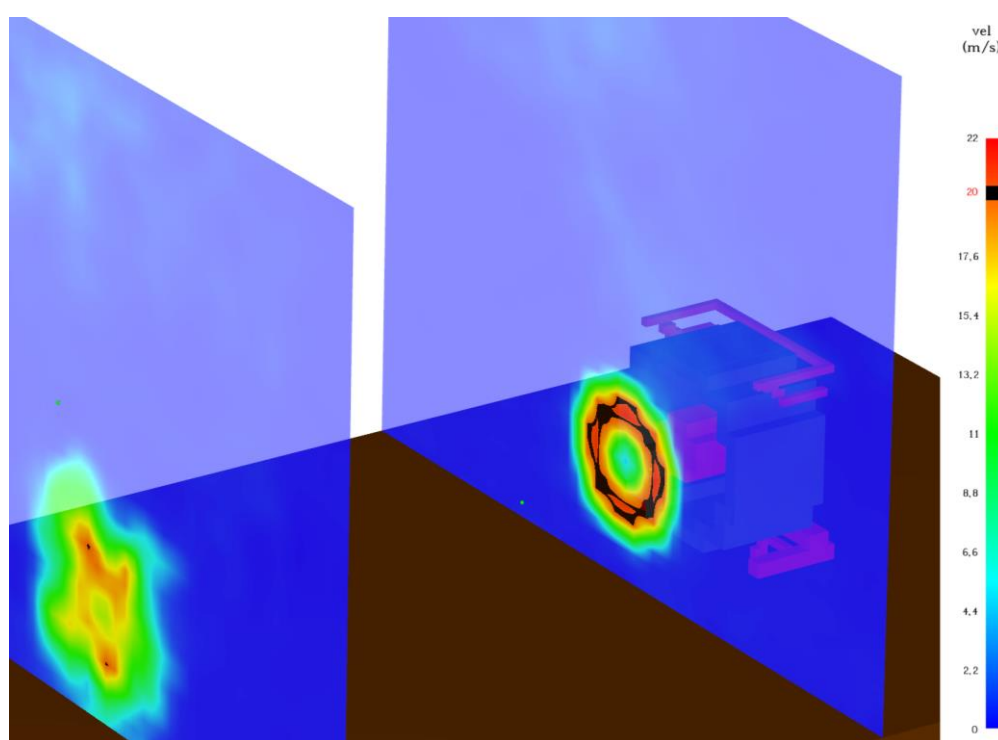
W wykonanych symulacjach przepływ jest napędzany głównie przez wentylator. W analizach numerycznych zastosowano model przepływu izotermicznego. Takie działanie jest związane z tym, że podczas testowania pełnoskalowych metod badawczych (metoda B i C), w praktyce nie jest możliwe podanie dokładnego rozkładu temperatury w budynku dla każdej analizy. Dzięki przyjęciu modelu przepływu izotermicznego można interpretować wyniki CFD wyłącznie jako efekt wymuszenia przepływu przez wentylator. Transport pędu w skali struktur turbulentnych poniżej rozdzielczości siatki realizowany jest za pomocą modelu lepkości wirowej opartego na modelu Deardoffa [55], a szczegóły implementacji modelu SGS Smagorinsky'ego podano w dokumentacji technicznej programu [54]. Program FDS wykorzystuje wyraźne kroki czasowe z automatyczną kontrolą, aby utrzymać maksymalny warunek Couranta-Friedrichsa-Lewy'ego CFL w domenie w zakresie od 0,8 do 1,0 [54]. Równanie Poissona dla ciśnienia rozwiązywane jest bezpośrednio na podstawie *Fast Fourier Transform* FFT z biblioteki CRAYFISHPAK [54]. Aktualizacja rozwiązywania równania prędkości i ciśnienia następuje wielokrotnie dla każdego kroku czasowego do zmniejszenia maksymalnego błędu prędkości poniżej określonego progu tolerancji (ustawionego na poziomie 0,001 m/s).

Walidację programu umożliwiającego prognozowanie rozkładów profilu prędkości przepływu oraz prognozowanie rozprzestrzeniania dymu (w warunkach pożaru), przeprowadzono w pełnoskalowych eksperymentach [6, 22, 56]. Do wizualizacji symulacji CFD wykorzystano oprogramowanie Smokview firmy NIST oraz PyroSim w wersji 2022.3.1208.

Sposób przepływu strugi powietrza wytwarzanej przez jednostkę wentylatorową opisano z użyciem funkcji „Velocity Patch” [57]. Współczynniki wielomianu funkcji, reprezentujące

wartości prędkości, zostały dopasowane do powierzchni wirnika wentylatora (rys. 40), w taki sposób, aby podczas jego pracy w ramach symulacji CFD wytwarzał objętościowe natężenie przepływu (mierzone z użyciem funkcji „*volume flow in the gas phase*”) zgodne z wartością uzyskaną z użyciem metody (X) opisanej w rozdziale 9 (tabela 7).

Podczas analiz CFD zwiększono liczbę iteracji dla ciśnienia do wartości 50 oraz wyłączyło funkcję zawieszającą iteracje dla domyślnego współczynnika różnicy wartości ciśnienia w nowym kroku czasowym względem wartości w poprzednim kroku czasowym. Operacje te wykonano w celu zwiększenia dokładności odwzorowania ciśnienia w analizach CFD.



Rys. 40. Symulacja CFD strumienia przepływu strugi powietrza z wentylatora mobilnego z wykorzystaniem funkcji „velocity patch”

10.1. Symulacja CFD metody badawczej A – test PN-EN ISO 5801

Na potrzeby symulacji w programie FDS, pozwalającej na odzwierciedlenie warunków testowych zgodnych z metodą A (test w kanale przepływowym PN-EN ISO 5801), stworzony został model przestrzenny układu testowego, jego otoczenia zewnętrznego oraz wentylatora mobilnego. Model przestrzenny został zbudowany na kartezjańskiej siatce obliczeniowej podzielonej na 1 267 200 komórek obliczeniowych, o wymiarach 0,01x0,01x0,01 m. W modelu zdefiniowano geometrię odpowiadającą rzeczywistym warunkom pracy stanowiska testowego oraz wentylatora. Wszystkie elementy modelu, w tym obudowa wentylatora i konstrukcja stalowa kanału

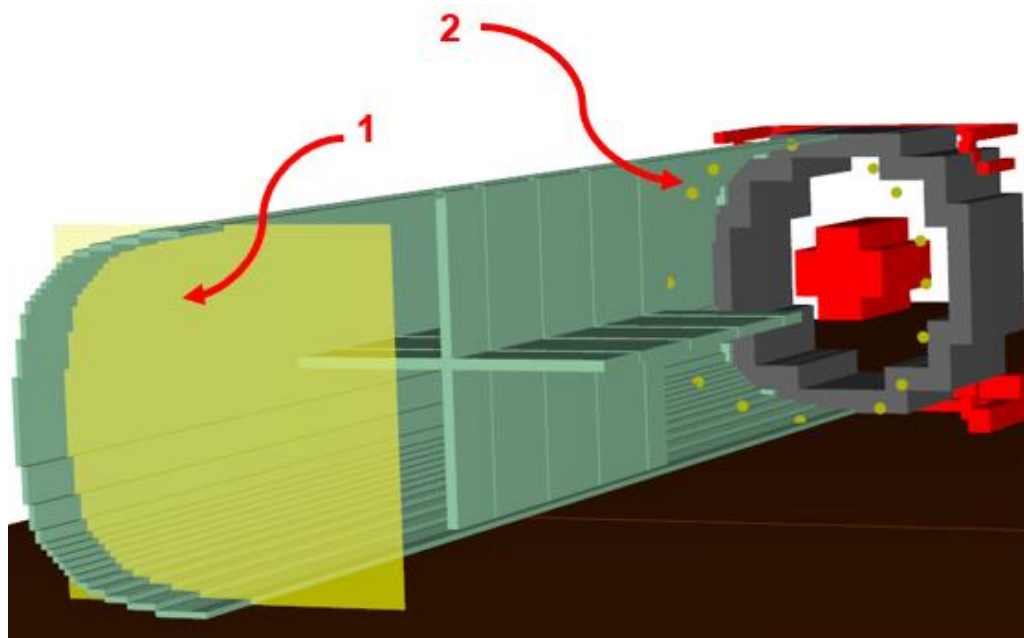
przepływowego, zostały wykonane z dokładnością odpowiadającą rozdzielczości komórki siatki, tj. 1 cm.

Pozostałe parametry modelu:

- ciśnienie atmosferyczne: 1013,25 hPa,
- temperatura otoczenia: 15°C,
- podstawowy materiał użyty do budowy modelu: stal,
- początkowa wilgotność względna: 50%,
- gradient temperaturowy atmosfery: 0,03 K/m.

Model wyposażono w punkty odczytu następujących parametrów przepływu (rys. 41):

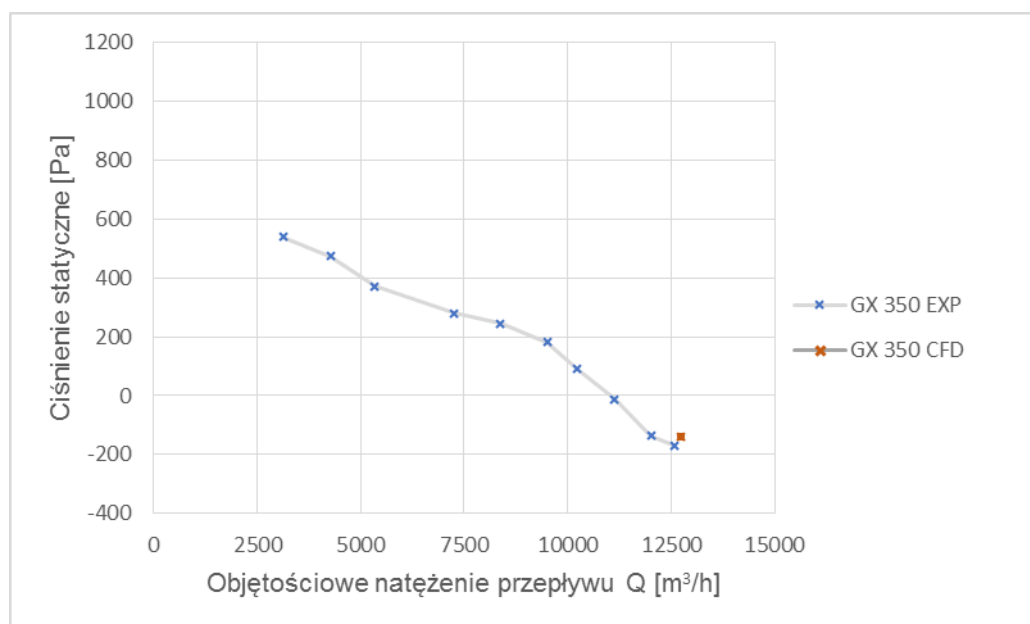
- objętościowe natężenie przepływu [m^3/h] w obszarze wylotowym kanału przepływowego – pomiar z użyciem funkcji „*volume flow in the gas phase*”,
- ciśnienie statyczne na obwodzie kanału przepływowego w obszarze mocowania wentylatora [Pa].



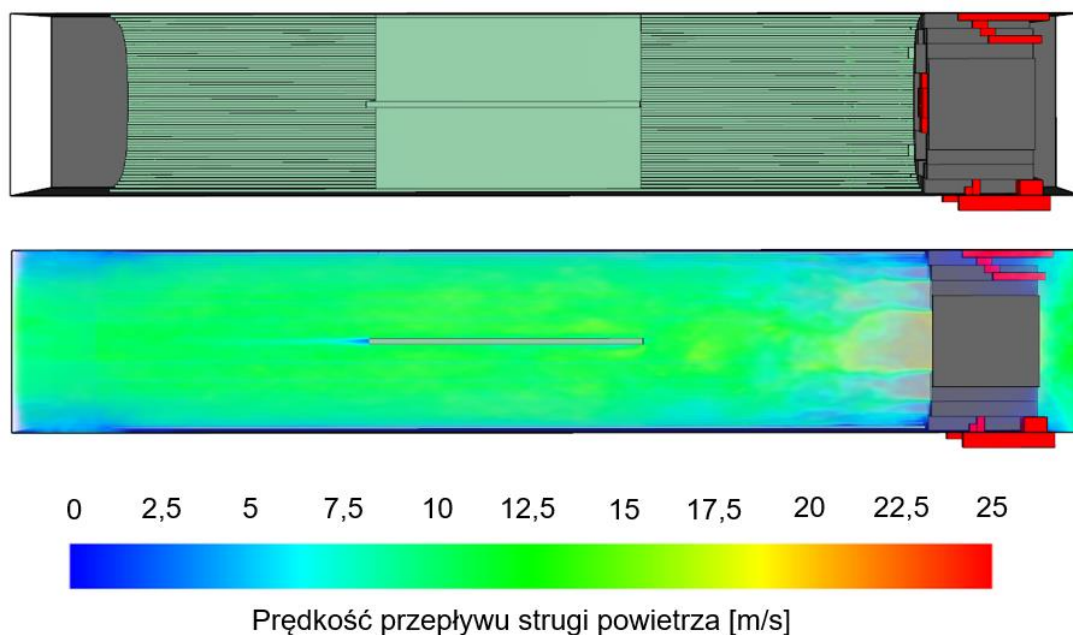
Rys. 41. Wizualizacja modelu numerycznego opracowanego na potrzeby symulacji – metoda A – PN-EN ISO 5801 (1 – płaszczyzna pomiaru strumienia objętości przepływu „*volume flow in the gas phase*”; 2 – rozkład punktów pomiaru ciśnienia statycznego)

Charakterystyka porównawcza parametrów przepływu wytwarzanego przez badany wentylator w warunkach rzeczywistych i w ramach symulacji CFD została przedstawiona na rys. 42 oraz w tabeli 8. Na rysunku 43 przedstawiono wizualizację symulacji CFD przepływu strugi powietrza wewnątrz kanału w warunkach zgodnych z PN-EN ISO 5801. Analiza numeryczna została wykonana dla jednego położenia

przepustnicy dławiącej (konfiguracja pełnego otwarcia), ponieważ jest to układ najbardziej zbliżony do warunków pracy w wolnym przepływie. W trakcie badań eksperymentalnych wentylator wytworzył objętościowy strumień przepływu powietrza o natężeniu 12 569,4 m³/h i ciśnienie -169,4 Pa. Objętościowe natężenie przepływu wytworzone podczas symulacji CFD wynosiło 12744,0 m³/h a ciśnienie -140,5 Pa. Na podstawie analizy wykazano poziom zbieżności (między wynikami eksperymentu i analizy CFD) opisany w postaci różnicy procentowej, która wynosiła w przypadku objętościowego strumienia przepływu ok. 1,4%, a w przypadku ciśnienia ok. 17,1%. Uzyskane wartości parametrów przepływu są zbieżne z rezultatami badań eksperymentalnych i symulacji CFD odnotowanymi przez innych naukowców. Fritsche i in. w 2018 r wykonali badania eksperymentalne i analizę CFD pomiaru objętościowego strumienia przepływu wytworzonego przez wentylator w kanale zamkniętym [39]. Podczas badań wentylator przetłoczył przez kanał strumień powietrza o natężeniu ok. 14 000 m³/h. Należy podkreślić też, że program pozwolił na odzwierciedlenie zjawiska ujemnej składowej prędkości (w obszarze wylotowym) powodującej powstawanie obszarów oderwań i lokalnych podciśnień na ścianach kanału, w którym wykonywano pomiar [16]. Taki wniosek potwierdza tezę o słuszności wykorzystania programu FDS do oceny parametrów przepływu z użyciem rozpatrywanych metod.



Rys. 42. Charakterystyka objętościowego natężenia przepływu powietrza i ciśnienia uzyskana w wyniku badań w warunkach rzeczywistych oraz symulacji CFD na stanowisku wykonanym zgodnie z PN-EN ISO – metoda A



Rys. 43. Wizualizacja symulacji CFD (rozkład profilu prędkości wewnątrz kanału) na podstawie badania parametrów przepływu zgodnie z PN-EN ISO 5801 (metoda A) – test w kanale przepływowym

Tabela 8. Wartości parametrów przepływu (objętościowe natężenie przepływu i ciśnienie) uzyskane w wyniku badań na stanowisku wykonanym zgodnie z PN-EN ISO 5801 – eksperyment w pełnej skali i symulacja CFD; (AVG – średnia arytmetyczna natężenia przepływu, *SD* – odchylenie standardowe przyjmowane za błąd pomiaru)

Przepustnica	Test	Objętościowe natężenie przepływu [m ³ /h]		Ciśnienie statyczne [Pa]	
		AVG	SD	AVG	SD
Otwarta	eksperyment	12 569,4	311,4	-169,4	4,4
	analiza CFD	12 744,0	-	-140,5	-
	różnica [%]	1,4		17,1	

10.2. Symulacja CFD metody badawczej B – badanie charakterystyk profilu prędkości strugi powietrza w wolnym przepływie

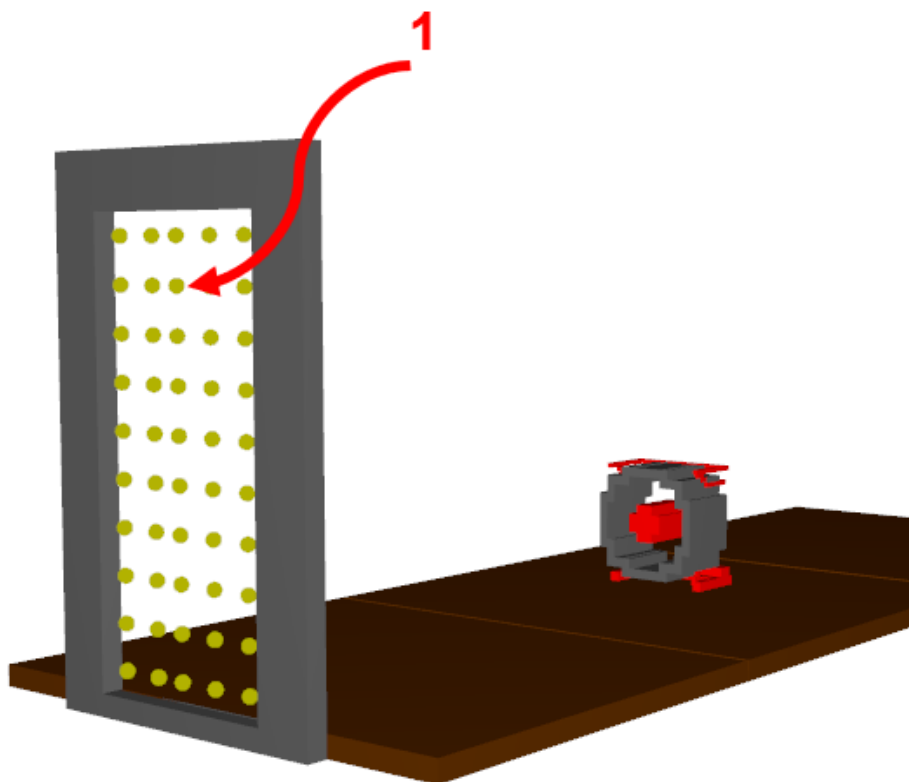
Na potrzeby symulacji CFD, mającej na celu odzwierciedlenie warunków występujących podczas badań w wolnym przepływie (test charakterystyki profilu prędkości strugi powietrza na powierzchni otworu drzwiowego – metoda B) zbudowano model przestrzenny stanowiska, jego otoczenia zewnętrznego oraz wentylatora mobilnego. Model przestrzenny został zbudowany na kartezjańskiej siatce obliczeniowej podzielonej na 447 252 komórki obliczeniowe o wymiarach 0,05x0,05x0,05 m. W modelu

zdefiniowano geometrię odpowiadającą rzeczywistym warunkom pracy stanowiska testowego oraz wentylatora. Wszystkie elementy modelu, w tym obudowa wentylatora i konstrukcja stanowiska, zostały wykonane z dokładnością odpowiadającą rozdzielczości komórki siatki 5 cm.

Pozostałe parametry modelu to:

- ciśnienie atmosferyczne: 1013,25 hPa,
- temperatura otoczenia: 15°C,
- podstawowe materiały zastosowane do budowy modelu: stal i drewno,
- początkowa wilgotność względna: 50%,
- gradient temperaturowy atmosfery: 0,03 K/m.

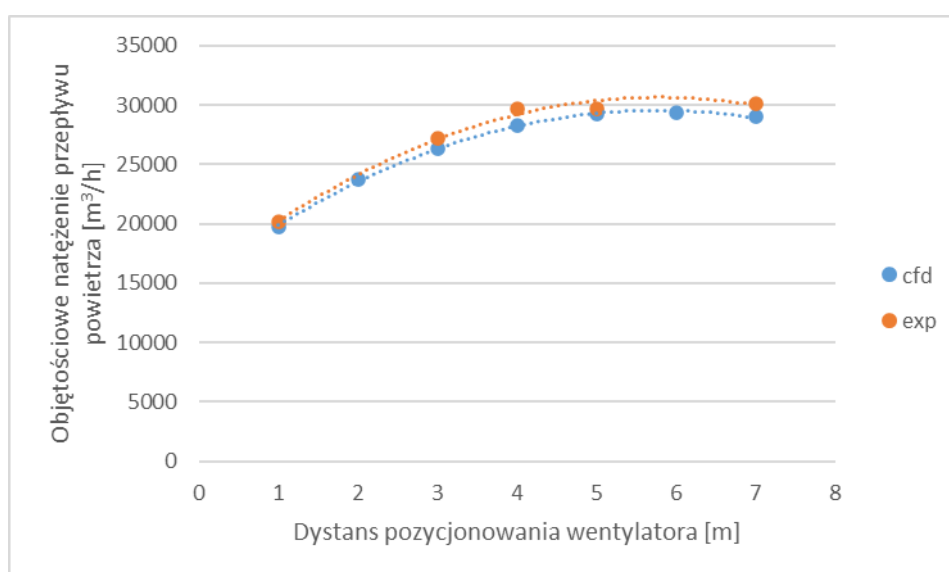
Model wyposażono w 50 punktów odczytu (rys. 44) prędkości przepływu strugi powietrza [m/s] na powierzchni otworu drzwiowego (taki sam układ jak w badaniach eksperymentalnych w warunkach rzeczywistych).



Rys. 44. Wizualizacja symulacji CFD – metoda B; 1 – punkt pomiaru prędkości przepływu

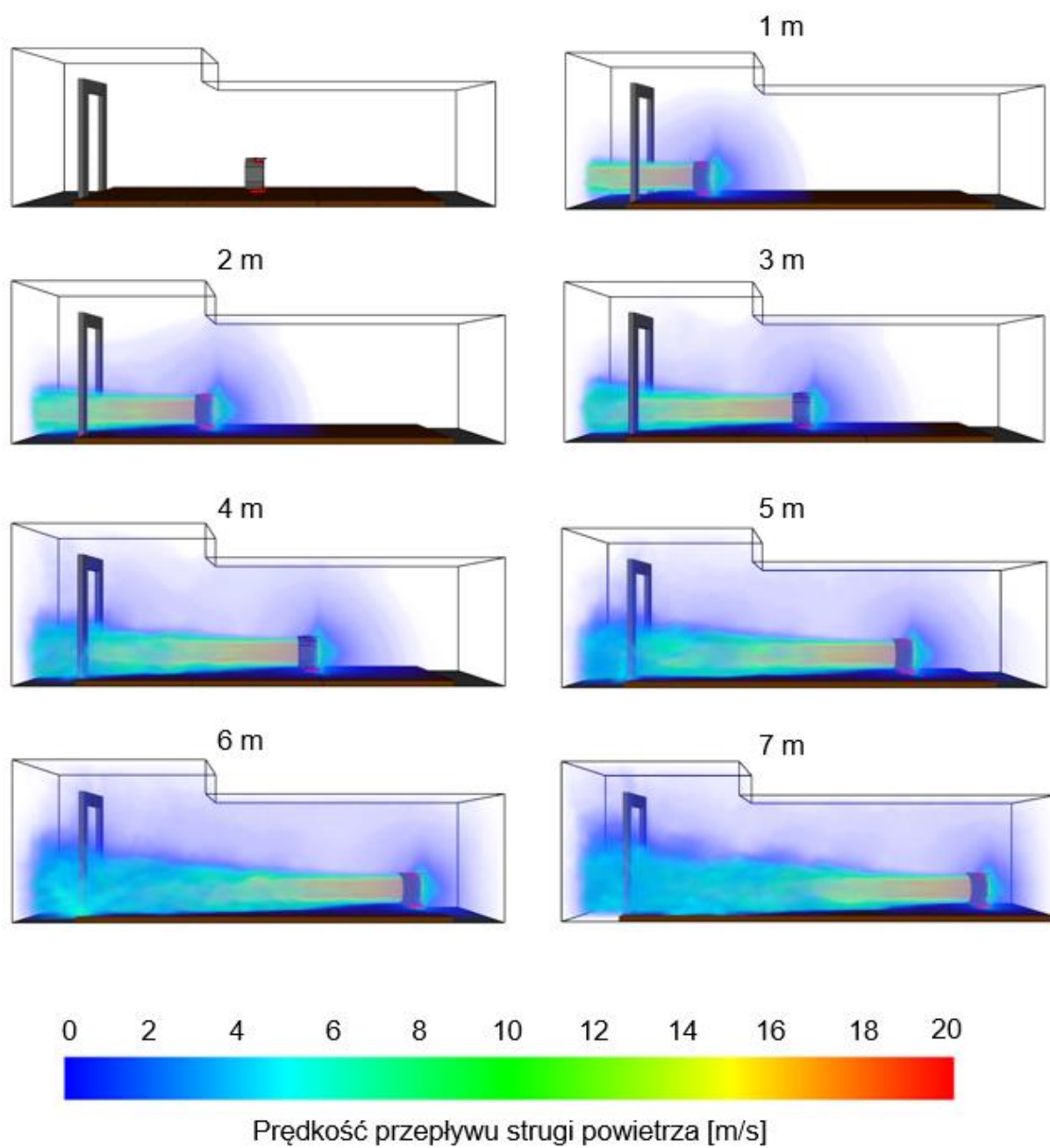
Charakterystyka porównawcza objętościowego natężenia przepływu wytworzonego przez wentylator w warunkach badań rzeczywistych i symulacji CFD odpowiadających warunkom metody B została przedstawiona na rys. 45. Na rysunkach 46 i 47

przedstawiono wizualizacje symulacji CFD prowadzonej w warunkach metody B. Analizując uzyskane wartości objętościowego natężenia przepływu, należy zaznaczyć że wentylator wygenerował największy strumień przy ustawieniu w odległości 4 m w badaniach eksperymentalnych ($29\,705\text{ m}^3/\text{h}$) oraz 5 m w symulacji CFD ($29\,220\text{ m}^3/\text{h}$). Należy wskazać że wentylator pracował najmniej efektywnie, kiedy został ustawiony w odległości 1 m od otworu drzwiowego. Zależność ta występuje zarówno w badaniach eksperymentalnych ($20\,123,4\text{ m}^3/\text{h}$), jak i w symulacji CFD ($19\,742,6\text{ m}^3/\text{h}$). Porównując wyniki badań natężenia przepływu uzyskane w trakcie eksperymentu i analiz CFD, wykazano poziom zbieżności opisany przez różnicę procentową wynoszącą od 1,6% (dla odległości 5 m przed otworem drzwiowym) do 4,8% (dla odległości 4 m przed otworem drzwiowym). Szczegółowe zestawienie parametrów przepływu przedstawiono w tabeli 9. W 2014 r. Lambert i Merci wykonali badania podobnych jednostek wentylatorowych, które wytworzyły przepływ o natężeniu $30\,800\text{ m}^3/\text{h}$ (wentylator z silnikiem spalinowym) oraz $30\,000\text{ m}^3/\text{h}$ (wentylator z napędem elektrycznym) [4].

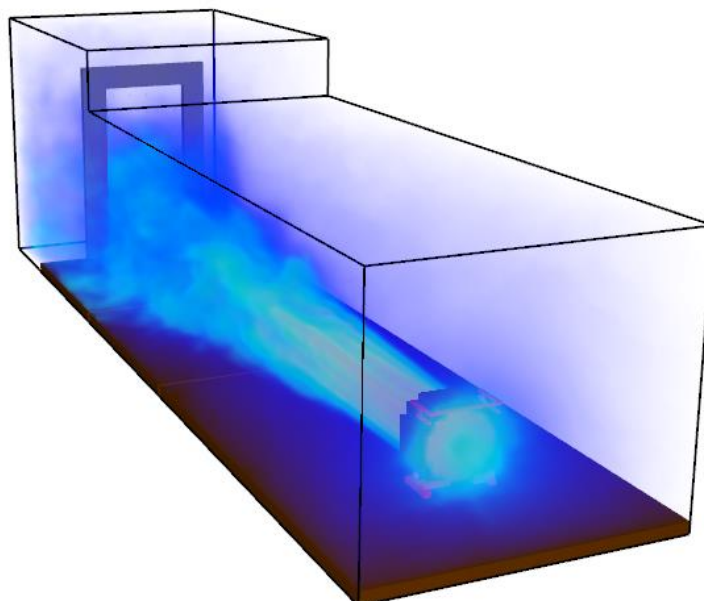


Rys. 45. Charakterystyka objętościowego natężenia przepływu w zależności od odległości wentylatora od otworu drzwiowego, uzyskana w wyniku badań w warunkach rzeczywistych (exp) oraz symulacji CFD (cfd) – metoda B

Rozpatrując kwestie zbieżności wyników badań i dokładności metody, należy wspomnieć również o rezultatach uzyskanych przez Kerbera i Waltona (2003), którzy pierwsi zaimplementowali stanowisko badawcze wykorzystane w metodzie B [22]. Zbadany przez nich wentylator generował przepływ o natężeniu $23\,900\text{ m}^3/\text{h}$. Mając na uwadze wyniki analiz, należy wskazać, że program FDS stanowi odpowiednie narzędzie pozwalające odzwierciedlać zjawiska przepływowe w ramach metody B.



Rys. 46. Wizualizacja symulacji CFD – metoda B; odległość od otworu drzwiowego od 1 m do 7 m



Rys. 47. Wizualizacja symulacji CFD – metoda B

Tabela 9. Wartości objętościowego natężenia przepływu powietrza uzyskane w wyniku eksperymentu w warunkach rzeczywistych i symulacji CFD przy zmiennych parametrach pozycjonowania wentylatora GX 350 (AVG – średnia arytmetyczna natężenia przepływu, SD – odchylenie standardowe przyjmowane za błąd pomiaru)

Odległość od otworu drzwiowego [m]	Przypadek	Objętościowe natężenie przepływu [m³/h]	
		AVG	SD
1	eksperyment	20 123,4	1404
	analiza CFD	19 742,6	-
	różnica [%]	1,9	
2	eksperyment	-	-
	analiza CFD	23 717,2	-
	różnica [%]	-	
3	eksperyment	27 230,8	2492
	analiza CFD	26 294,3	-
	różnica [%]	3,4	
4	eksperyment	29 705,1	2973
	analiza CFD	28 282,8	-
	różnica [%]	4,8	
5	eksperyment	29 695,0	2686
	analiza CFD	29 220,3	-
	różnica [%]	1,6	
6	eksperyment	-	-
	analiza CFD	29 396,9	-
	różnica [%]	-	
7	eksperyment	30 156,3	2938
	analiza CFD	29 019,3	-
	różnica [%]	3,8	

10.3. Symulacja CFD metody badawczej C – badania parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne w rzeczywistych warunkach pracy – testy na terenie wielokondygnacyjnego obiektu budowlanego [A13]

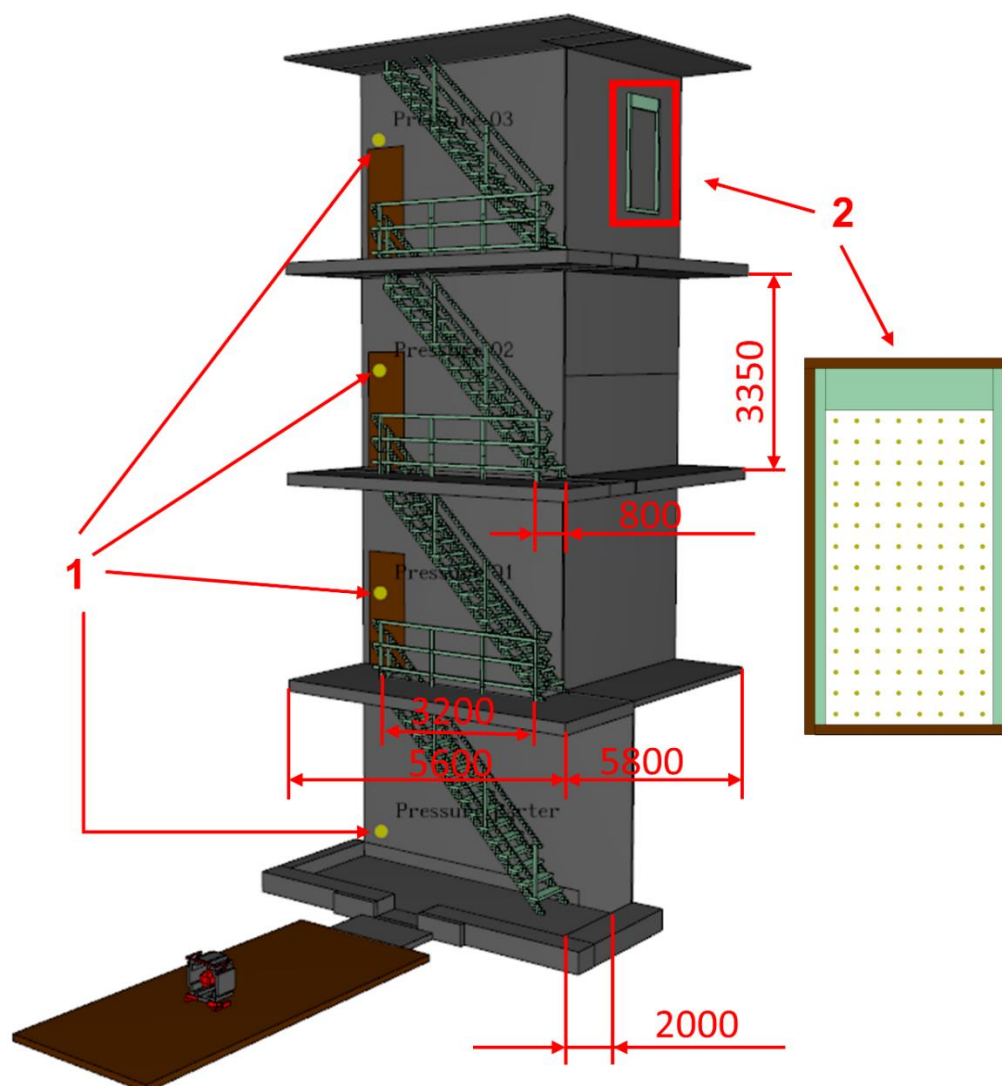
Na potrzeby wykonania symulacji w programie FDS, mającej na celu odzwierciedlenie warunków występujących podczas badań w wolnym przepływie (metoda C – testy na terenie wielokondygnacyjnego obiektu budowlanego), stworzono model przestrzenny obiektu budowlanego, jego otoczenia zewnętrznego oraz wentylatora mobilnego. Model przestrzenny został zbudowany na kartezjańskiej siatce obliczeniowej podzielonej na 2 814 920 komórek obliczeniowych o wymiarach 0,05x0,05x0,05 m. W modelu zdefiniowano geometrię odpowiadającą warunkom rzeczywistym i rozmiarom 4-kondygnacyjnego obiektu budowlanego oraz wentylatora. Wszystkie elementy modelu, w tym obudowa wentylatora, klatka schodowa oraz przeszkody na korytarzach, barierki, stopnice i otwory w stropie, zostały wykonane z dokładnością odpowiadającą rozdzielczości komórki siatki 5 cm.

Pozostałe parametry modelu to:

- ciśnienie atmosferyczne: 1013,25 hPa,
- temperatura otoczenia: 15°C,
- podstawowe materiały użyte do budowy modelu: stal, żelbet, szkło budowlane, gips, płytki ceramiczne,
- początkowa wilgotność względna: 50%,
- gradient temperaturowy atmosfery: 0,03 K/m.

Model wyposażono w punkty odczytu następujących parametrów przepływu (rys. 48):

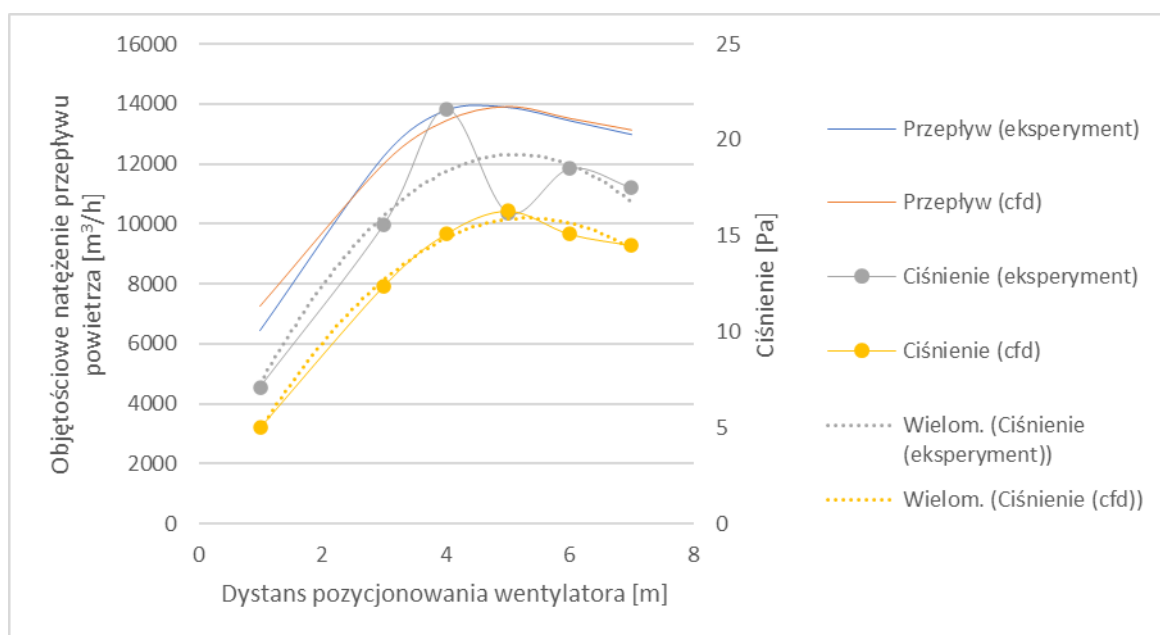
- prędkość przepływu strugi powietrza [m/s] na powierzchni otworu wylotowego (okiennego), zlokalizowanego na czwartej kondygnacji (taki sam układ jak w badaniach eksperymentalnych) – 120 punktów pomiarowych;
- ciśnienie statyczne [Pa] na każdej z czterech kondygnacji, mierzone w takiej samej lokalizacji jak podczas testów rzeczywistych.



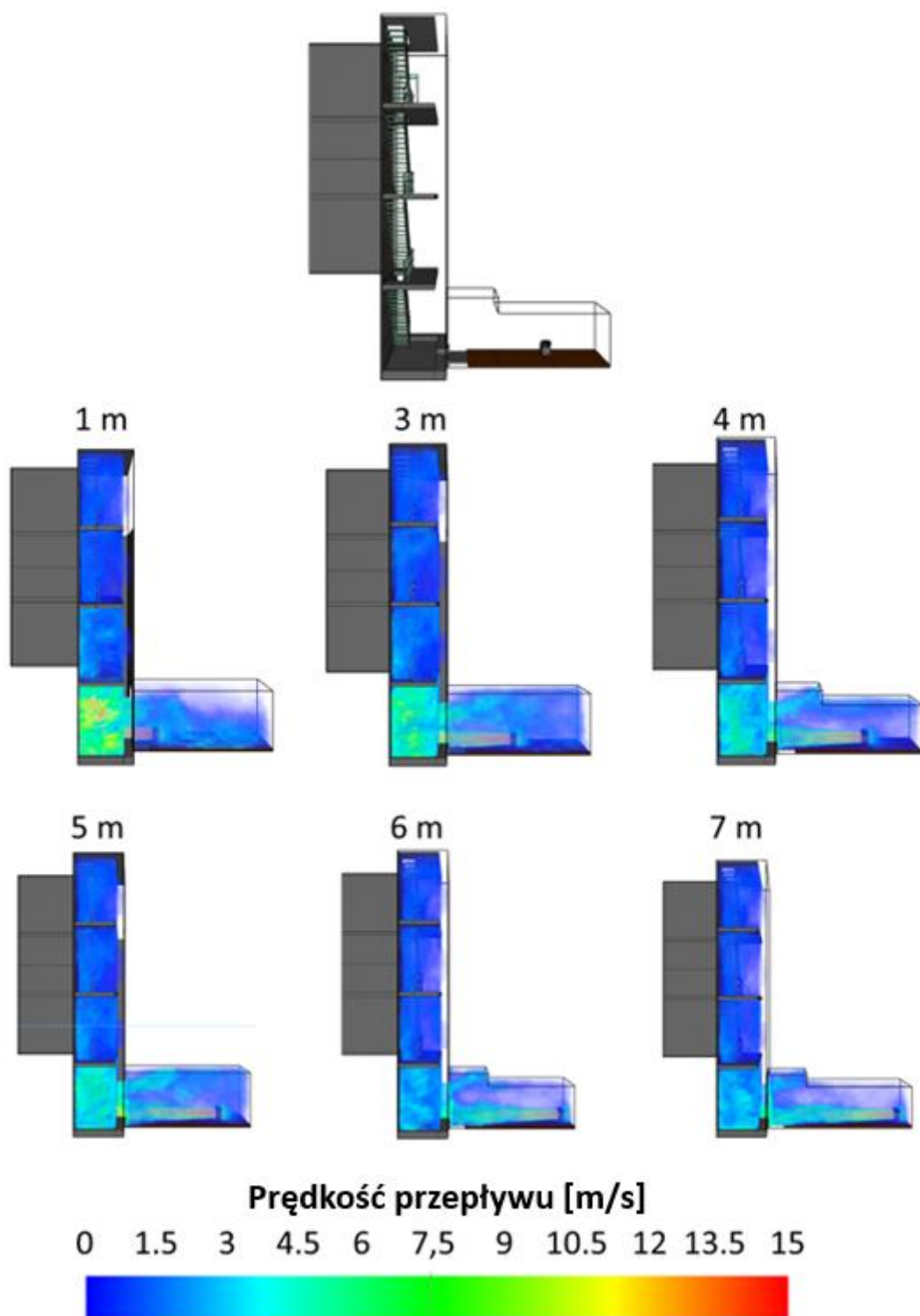
Rys. 48. Wizualizacja symulacji CFD – metoda C; 1 – czujnik wartości ciśnienia statycznego, 2 – otwór okienny – płaszczyzna pomiarowa o powierzchni $1,2 \text{ m}^2$ (120 punktów pomiaru prędkości strugi powietrza)

Charakterystyka porównawcza parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylator w warunkach badań rzeczywistych i podczas symulacji została przedstawiona na rys. 48. Szczegółowe zestawienie wartości objętościowego natężenia przepływu i ciśnienia przedstawiono w tabeli 10. Podczas badań eksperymentalnych wentylator wytworzył największy objętościowy strumień przepływu ($13\,876 \text{ m}^3/\text{h}$ ($\pm 775 \text{ m}^3/\text{h}$)), gdy był ustawiony w odległości 5 m od otworu drzwiowego (przy średnim ciśnieniu $16,2 \text{ Pa}$). W trakcie symulacji CFD wentylator wytworzył przepływ o natężeniu $13\,926 \text{ m}^3/\text{h}$ ($\pm 773 \text{ m}^3/\text{h}$) i średnim ciśnieniu $16,3 \text{ Pa}$. Wentylator pracował najmniej efektywnie, gdy był ustawiony w odległości 1 m od otworu drzwiowego. Powyższą zależność stwierdzono podczas badań eksperymentalnych i symulacji CFD. Przy takim ustawieniu wentylatora

podczas badań rzeczywistych natężenie przepływu wynosiło $6432 \text{ m}^3/\text{h}$ ($\pm 427 \text{ m}^3/\text{h}$), a średnie ciśnienie $7,1 \text{ Pa}$; podczas symulacji natężenie przepływu wynosiło $7270 \text{ m}^3/\text{h}$ ($\pm 514 \text{ m}^3/\text{h}$), a uśrednione ciśnienie $5,0 \text{ Pa}$. Na rysunku 50 przedstawiono wizualizację symulacji CFD przepływu strugi powietrza przez kubaturę obiektu budowlanego dla odległości od otworu drzwiowego wynoszącej 1 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m i 7 m. W wyniku analizy porównawczej wyników badań eksperymentalnych oraz symulacji CFD odnotowano rozbieżności między wartościami objętościowego natężenia przepływu od 0,4% do 13,0% dla odległości od otworu drzwiowego, odpowiednio, 5 m i 1 m. Rozbieżności między wartościami ciśnienia były większe: od 0,6% do 30,1% dla odległości od otworu drzwiowego, odpowiednio, 5 m i 4 m. Ezekoye w 2007 r. badał wentylatory o mocy od 3 kW do 4,85 kW (o natężeniu przepływu od $25\,092 \text{ m}^3/\text{h}$ do $48\,600 \text{ m}^3/\text{h}$) i wykazał, że wentylatory o mocy 4,85 kW wytwarzają przepływ o największym natężeniu w odległości od otworu drzwiowego od 2,5 m do co najmniej 3,5 m (autorzy nie prowadzili dalej badań) [2]. Ingason i Fallberg (2002) wykazali, że w przypadku wentylatora o mocy 4,1 kW najkorzystniejsza odległość między wentylatorem a otworem drzwiowym wynosi 3 m (w większej odległości nie prowadzono badań, jednak nie zaobserwowano trendu spadkowego) [58].

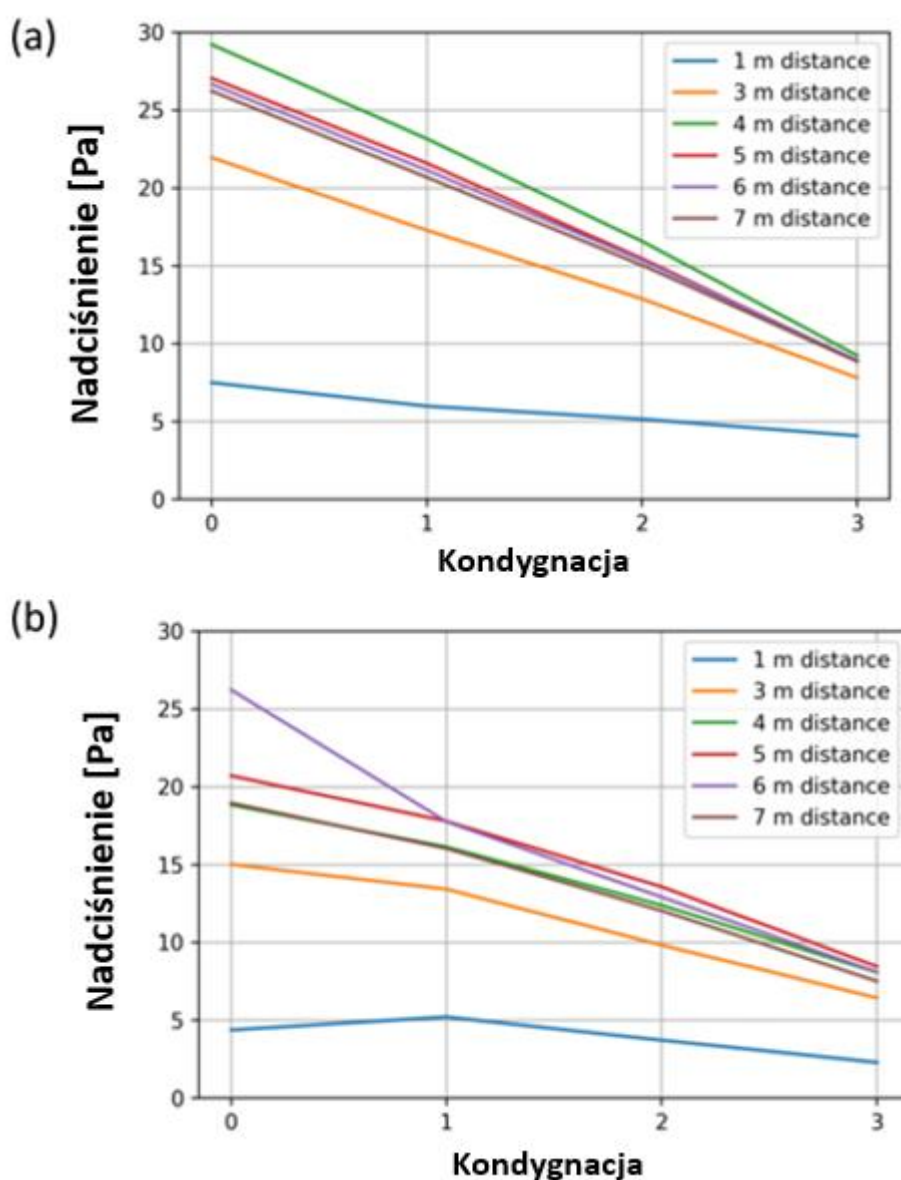


Rys. 49. Charakterystyki objętościowego natężenia przepływu powietrza i ciśnienia statycznego w funkcji odległości między wentylatorem a otworem drzwiowym, uzyskane w wyniku badań w warunkach rzeczywistych oraz symulacji CFD – metoda C



Rys. 50. Wizualizacja symulacji CFD – metoda C (przed i po stabilizacji) – rozkład profili prędkości strugi powietrza w obiekcie budowlanym, wytwarzanej przez wentylator mobilny dla odległości od otworu drzwiowego 1–7 m

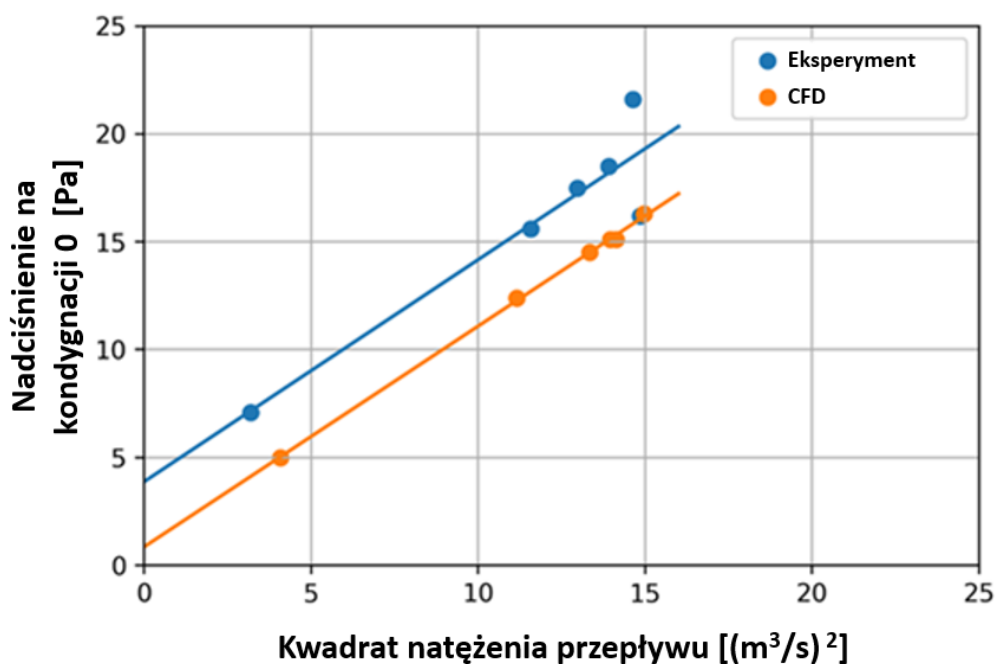
Na rysunku 51 zobrazowano zmianę wartości ciśnienia na kolejnych piętrach zarejestrowaną w badaniach eksperymentalnych i podczas analizy CFD. W obu przypadkach spadki ciśnienia na kolejnych piętrach są zbliżone, co świadczy o podobieństwie pola przepływu na każdej kondygnacji i o niemal liniowej zależności współczynnika strat ciśnienia budynku od liczby pięter, przez które przetłacza się powietrze. Podobną zależność wykazali również Paninder z zespołem [5–6] oraz Li i in. [59].



Rys. 51. Zmiany ciśnienia na kolejnych piętrach odnotowane w wyniku badań (a) oraz symulacji CFD (b)

Wartości strat ciśnienia o charakterze miejscowym, tj. związanych ze zmianą ciśnienia statycznego na ciśnienie dynamiczne (prędkość przepływu) w przewężeniach (w otworach drzwiowych lub otworach pomiędzy piętrami), są proporcjonalne do kwadratu prędkości przepływu, a tym samym do kwadratu natężenia przepływu.

Na rysunku 52 pokazano zmiany nadciśnienia na parterze budynku (a więc jednocześnie zmiany strat przepływu) w funkcji kwadratu objętościowego natężenia przepływu. Ponadto na tym wykresie pokazano liniowe regresje obu charakterystyk. Ich współczynniki nachylenia wynoszą $1,029 \text{ Pa} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-6}$ (eksperyment) i $1,023 \text{ Pa} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-6}$ (analiza numeryczna). Tak zbliżone wartości świadczą o tym, że badana metoda analizy przepływu umożliwia niezwykle dokładne oszacowanie strat przepływu w budynkach. Różnica między dwoma regresjami wynosi $3,02 \text{ Pa}$. Szacuje się, że ta niewielka różnica wynika nie tylko z błędu pomiaru, ale też z występowania aerostatycznego komponentu zmian ciśnienia w eksperymencie (temperatura wewnątrz budynku wyższa o $5\text{-}6 \text{ K}$ od temperatury powietrza na zewnątrz jest wystarczająca do wygenerowania tego rzędu różnicy ciśnienia statycznego). W praktyce ocena tej składowej ciśnienia wyporu jest nieprzydatna, ponieważ jest wynikiem rozkładu temperatury powietrza wzdłuż przepływu na toru wymiany gazowej. W niniejszej pracy wykazano, że analiza izotermiczna jest użytecznym narzędziem przeznaczonym do oceny oporów przepływu w budynku i do wskazania optymalnego umiejscowienia wentylatora, co jest najważniejsze dla użytkownika końcowego.



Rys. 52. Zależność zmian nadciśnienia na pierwszej kondygnacji w funkcji kwadratu objętościowego natężenia przepływu

Tabela 10. Objętościowe natężenie przepływu powietrza oraz wartości ciśnienia statycznego – wyniki eksperymentu w warunkach rzeczywistych i symulacji CFD (przy zmiennych parametrach pozycjonowania wentylatora mobilnego, (AVG – średnia arytmetyczna natężenia przepływu, *SD* – odchylenie standardowe przyjmowane za błąd pomiaru)

Ustawienie wentylatora względem otworu drzwiowego [m]	Test	Objętościowe natężenie przepływu [m³/h]		Ciśnienie statyczne – wartość średnia dla kondygnacji 1-4 [Pa]		Wartość ciśnienia uzyskana dla kondygnacji 1-4 [Pa]							
						1		2		3		4	
		AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD
1	eksperyment	6431,9	427,1	7,1	1,1	9,0	1,5	7,7	1,1	6,5	0,9	5,1	0,7
	analiza CFD	7269,6	-	5,0	-	8,5	-	5,3	-	3,8	-	2,3	-
	różnica [%]	13,0%		29,6		5,6		31,2		41,5		45,1	
3	eksperyment	12 252,8	662,2	15,6	2,0	22,8	2,7	17,9	2,2	13,4	1,8	8,2	1,2
	analiza CFD	12 024,1	-	12,4	-	19,4	-	13,8	-	9,9	-	6,4	-
	różnica [%]	1,9%		20,5		11,6		22,9		24,2		21,5	
4	eksperyment	13 774,1	743,6	21,6	2,6	31,8	3,4	25,4	2,8	18,5	2,4	10,9	1,7
	analiza CFD	13 449,1	-	15,1	-	23,0	-	16,9	-	12,4	-	8,0	-
	różnica [%]	2,4		30,1		34,0		33,5		33,0		26,6	
5	eksperyment	13 875,5	775,7	16,2	2,7	24,0	3,7	19,5	3,1	13,7	2,4	7,8	1,5
	analiza CFD	13 925,7	-	16,3	-	24,6	-	18,4	-	13,7	-	8,5	-
	różnica [%]	0,4		0,6		2,4		5,6		0		8,2	
6	eksperyment	13 430,8	703,9	18,5	2,2	27,4	3,1	21,8	2,5	15,8	1,9	9,2	1,3
	analiza CFD	13 530,0	-	15,1	-	21,7	-	15,9	-	11,2	-	11,6	-
	różnica [%]	0,7		18,4		20,9		27,1		29,1		20,7	
7	eksperyment	12 969,1	673,5	17,5	2,3	26,1	3,2	20,4	2,6	14,8	1,9	8,6	1,2
	analiza CFD	13 145,3	-	14,5	-	21,7	-	16,4	-	12,1	-	7,6	-
	różnica [%]	1,4		17,1		16,9		19,6		18,2		11,6	

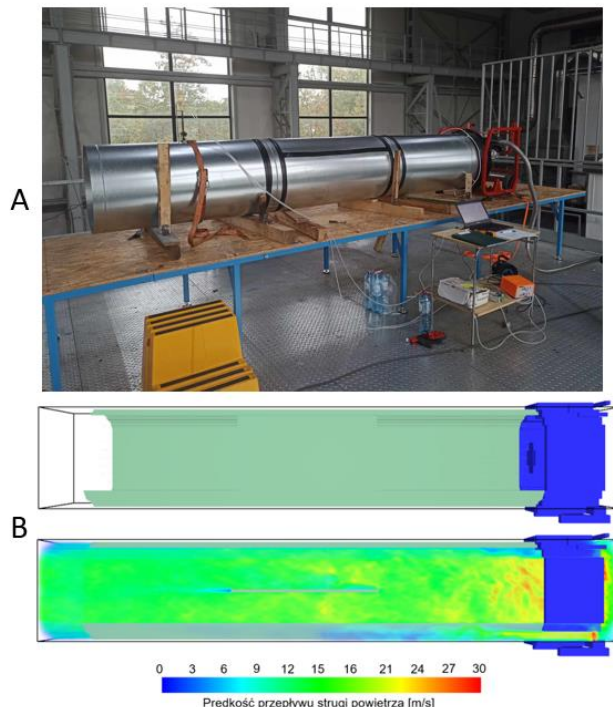
Podsumowując prace związane z przygotowaniem hybrydowej metody oceny parametrów przepływu (łącej badania w małej skali – metoda X – oraz analizę CFD), należy wskazać że uzyskano stopień zbieżności pozwalający z dobrą dokładnością ocenić wartości objętościowego natężenia przepływu i ciśnienia. Poziom dokładności można przedstawić liczbowo jako procentową różnicę między wynikami badań eksperymentalnych i symulacji CFD. Różnice te są następujące: w przypadku metody A – natężenie przepływu 1,4%, ciśnienie 17,1%, w przypadku metody B – natężenie przepływu 1,6–4,8%, w przypadku metody C – natężenie przepływu 0,4–13%, średnie ciśnienie 0,6–29,6%. Uzyskane wyniki potwierdziły, że opracowana metoda hybrydowa stanowi właściwe narzędzie służące do oceny efektywności działania wentylatora z użyciem ocenianych metod (A, B i C) bez konieczności prowadzenia czasochłonnych eksperymentów. Ponadto metoda ta może być stosowana w celu określania odpowiedniej odległości między wentylatorem a otworem drzwiowym oraz pozycji, w której wentylator pracuje z największą efektywnością (również w przypadku innych złożonych kubatur w obiektach budowlanych). Analizując opracowaną metodę, należy również wspomnieć o zakresie jej wykorzystania. Mogą ją stosować zarówno producenci, jak i użytkownicy – strażacy ratownicy. Producenci wentylatorów mobilnych, wykorzystując metodę hybrydową, zyskują narzędzie przeznaczone do prowadzenia

testów technologicznych, w tym do weryfikacji parametrów przepływu na stanowiskach testowych, których budowa pochłania znaczne zasoby czasowe i finansowe. Kolejny typ użytkowników, tj. strażacy ratownicy, mogą wykorzystać ją np. do testów parametrów wydajnościowych (w obszarze metod A, B i C) jednostek wentylatorowych które mają na wyposażeniu.

11. Walidacja modeli numerycznych dla badań parametrów przepływu (metody A, B i C)

W celu przeprowadzenia walidacji hybrydowej metody oceny parametrów przepływu (będącej połączeniem badań w małej skali i analizy numerycznej) zastosowano wentylator typu turbo – model GX500 (wentylator 4), którego korpus i strukturę (o wymiarach zgodnych z rzeczywistymi) odtworzono w programie Fire Dynamics Simulator. Parametry techniczne tego urządzenia zaprezentowano w tabeli 1. Ocenę pola prędkości przepływu wykonano z użyciem metody X zgodnie z założeniami opisanymi w rozdziale 9. Warunki brzegowe symulacji CFD ustawiono w taki sam sposób jak przedstawiono w rozdziale 10. Proces walidacji wykonywano z zastosowaniem modeli odpowiadających konfiguracjom testowym przyjętym w ramach metod A, B i C. W kolejnym etapie prac walidacyjnych wykonano badania eksperymentalne z wykorzystaniem metod badawczych A, B i C.

Układ testów eksperymentalnych oraz wizualizację modelu CFD dla metody A (badanie wg PN-EN ISO 5801) przedstawiono na rys. 53. Natomiast zestawienie wyników symulacji CFD oraz badań prowadzonych w warunkach rzeczywistych z użyciem rozpatrywanej metody (z uwzględnieniem uzyskanego stopnia zbieżności) przedstawiono w tabeli 11.

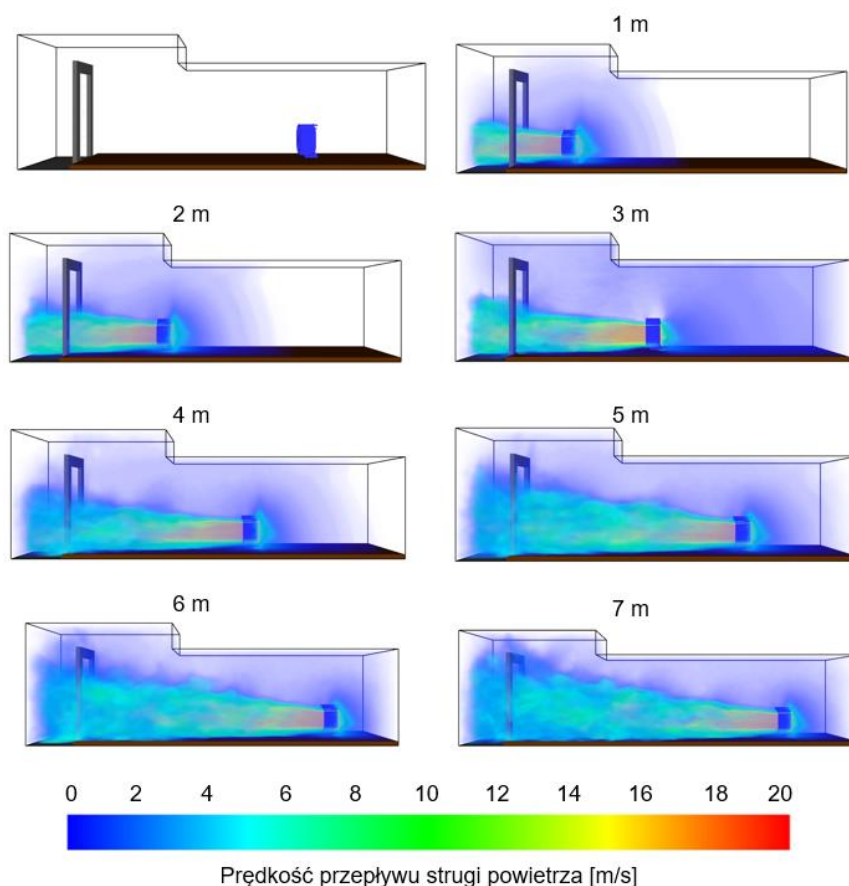


Rys 53. Układ testów eksperymentalnych (A) oraz wizualizacja symulacji CFD (B) badania parametrów przepływu wentylatora 4 zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5801 (metoda A)

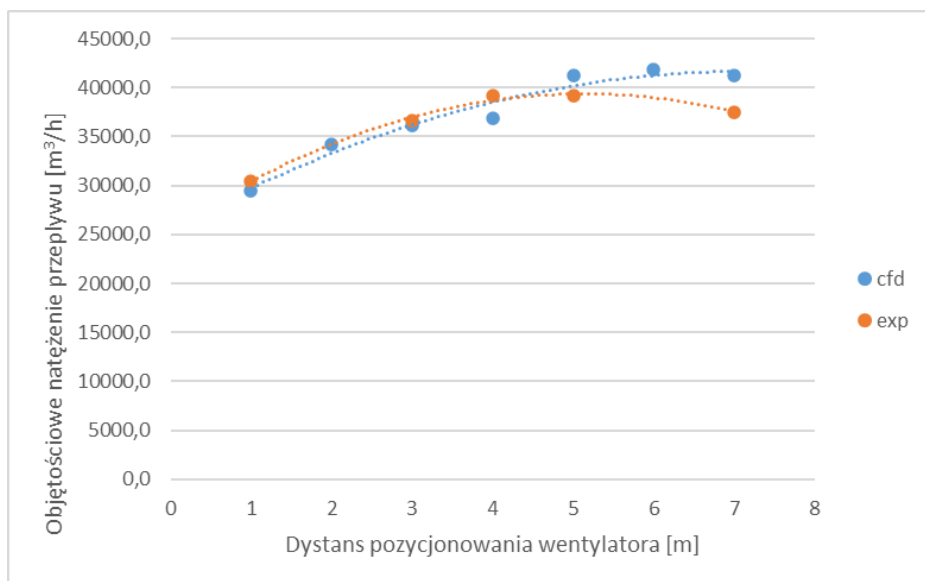
Tabela 11. Parametry przepływu (objętościowe natężenie przepływu i ciśnienie) uzyskane w trakcie badań na stanowisku wykonanym zgodnie z PN-EN ISO 5801 (eksperyment w pełnej skali i symulacja CFD) dla wentylatora GX 500 (jednostka walidacyjna) (AVG – średnia arytmetyczna natężenia przepływu, SD – odchylenie standardowe przyjmowane za błąd pomiaru)

Przepustnica	Test	Objętościowe natężenie przepływu [m ³ /h]		Ciśnienie statyczne [Pa]	
		AVG	SD	AVG	SD
Otwarta	eksperyment	18 347,7	431,5	-80,6	5,1
	analiza CFD	18 504,0	-	-62,7	-
	różnica [%]	0,85		22,2	

Wizualizację modelu CFD dla metody dla metody B przedstawiono na rys. 54. Uzyskane wyniki symulacji CFD oraz badań prowadzonych w warunkach rzeczywistych z użyciem rozpatrywanej metody (z uwzględnieniem uzyskanego stopnia zbieżności) przedstawiono w tabeli 12 oraz na charakterystyce porównawczej – rys. 55.



Rys. 54. Wizualizacja symulacji CFD (walidacja modelu) badania charakterystyk profilu prędkości strugi powietrza (metoda B) wytwarzanej przez wentylator GX500 w wolnym przepływie, dla odległości od otworu drzwiowego 1-7 m

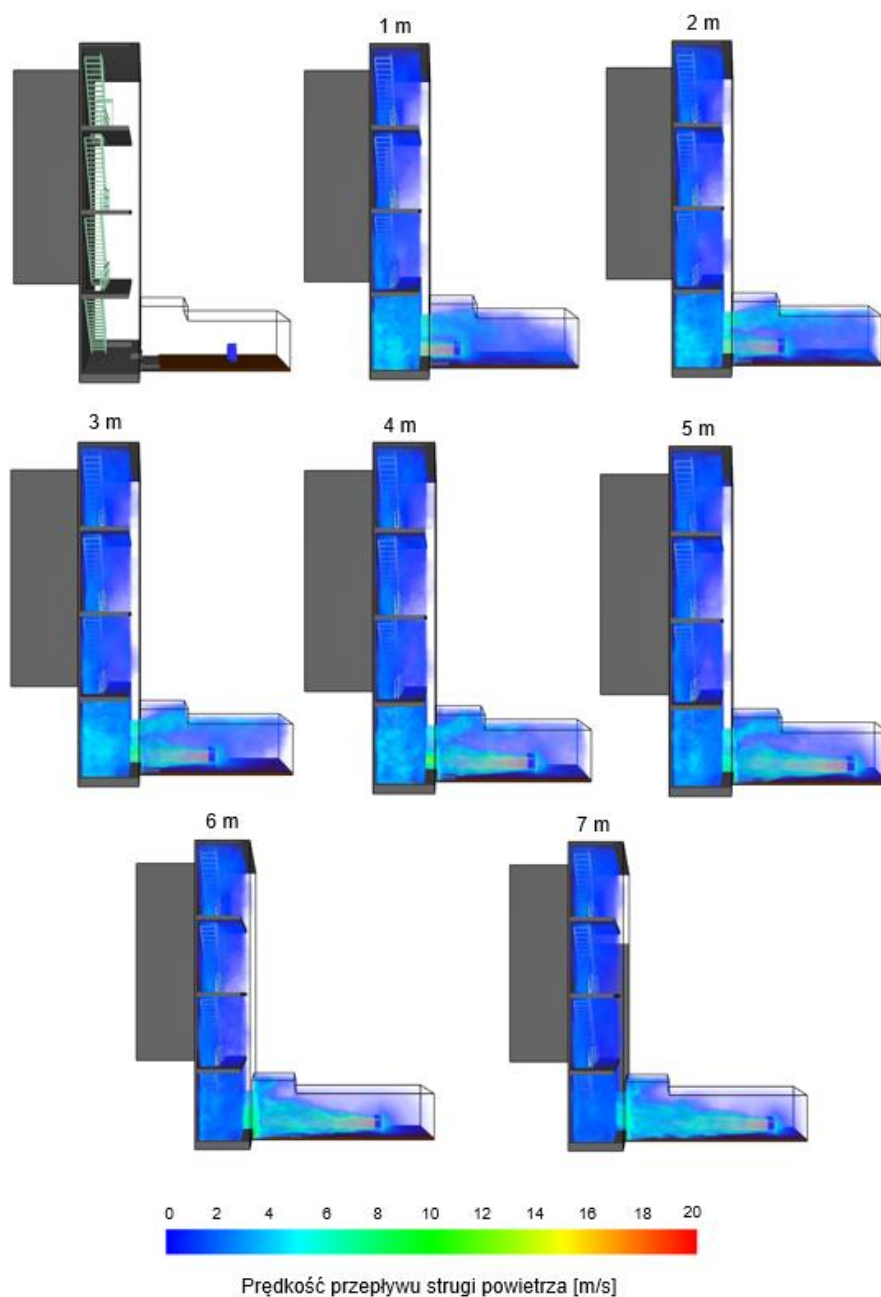


Rys. 55. Charakterystyka natężenia przepływu wentylatora GX500 – wyniki eksperymentu w pełnej skali i symulacji CFD przy zmiennych parametrach pozycjonowania (metoda B – Badanie charakterystyk profilu prędkości w wolnym przepływie)

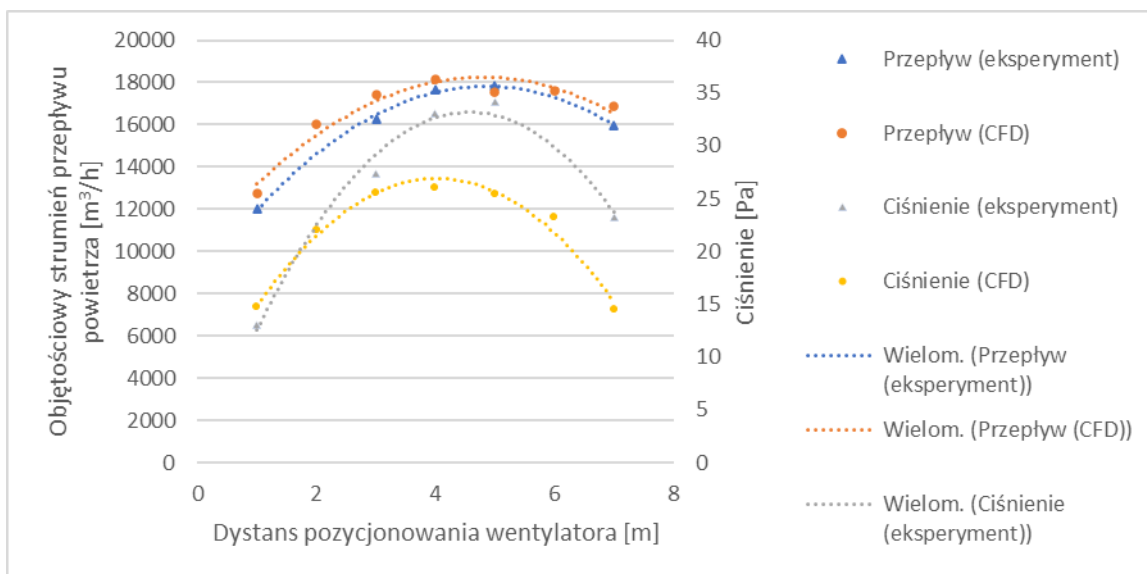
Tabela 12. Objętościowe natężenie przepływu powietrza – wyniki eksperymentu w pełnej skali i symulacji CFD przy zmiennych parametrach pozycjonowania wentylatora 4 (AVG – średnia arytmetyczna natężenia przepływu, SD – odchylenie standardowe przyjmowane za błąd pomiaru)

Odległość między wentylatorem a makietą drzwi [m]	Test	Objętościowe natężenie przepływu [m³/h]	
		AVG	SD
1	eksperyment	30 494,5	1902,2
	analiza CFD	29 438,4	-
	różnica [%]	3,5	
2	eksperyment	-	-
	analiza CFD	34 151,2	-
	różnica [%]	-	
3	eksperyment	36 622,7	3755,4
	analiza CFD	36 199,0	-
	różnica [%]	1,1	
4	eksperyment	39 158,4	3528,8
	analiza CFD	36 852,0	-
	różnica [%]	5,9	
5	eksperyment	39 215,2	1721,2
	analiza CFD	41 212,2	-
	różnica [%]	4,8	
6	eksperyment	-	-
	analiza CFD	41 830,4	-
	różnica [%]	-	
7	eksperyment	37 547,0	2924,5
	analiza CFD	41 232,2	-
	różnica [%]	8,9	

Wizualizacja symulacji CFD metody C (badania parametrów przepływu w rzeczywistym obiekcie budowlanym) została przedstawiona na rys 56. Uzyskane wyniki symulacji CFD oraz badań prowadzonych w warunkach rzeczywistych z użyciem rozpatrywanej metody (z uwzględnieniem stopnia zbieżności) przedstawiono w tabeli 13 oraz na charakterystyce porównawczej (rys. 57).



Rys. 56. Wizualizacja symulacji CFD metody C (walidacja modelu) – rozkład profili prędkości strugi powietrza w obiekcie budowlanym, wytwarzanej przez wentylator GX 500 umieszczony w odległości 1–7 m od otworu drzwiowego



Rys. 57. Charakterystyka przepływowa wentylatora 4 (objętościowe natężenie przepływu i ciśnienie) – wyniki eksperymentu w pełnej skali i symulacji CFD przy zmiennych parametrach pozycjonowania (metoda C – walidacja modelu)

Tabela 13. Objętościowe natężenie przepływu powietrza oraz wartości ciśnienia statycznego uzyskane w wyniku eksperymentu w pełnej skali i symulacji CFD (przy zmiennych parametrach pozycjonowania wentylatora GX 500 (jednostka walidacyjna), (AVG – średnia arytmetyczna natężenia przepływu, SD – odchylenie standardowe przyjmowane za błąd pomiaru)

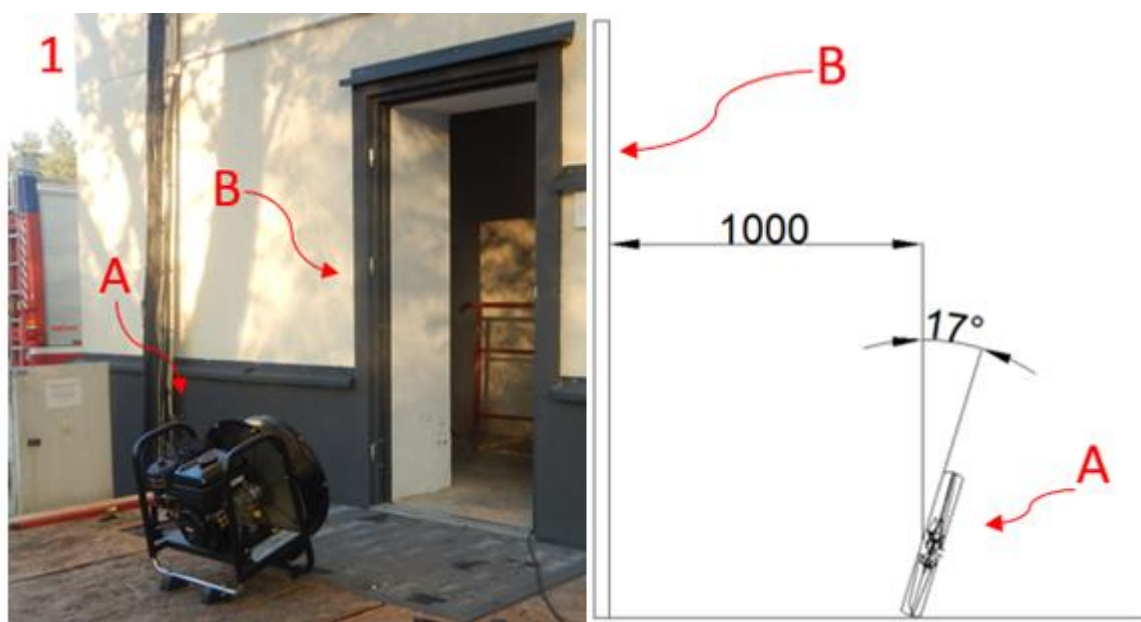
Odległość wentylatora od otworu drzwiowego [m]	Test	Objętościowe natężenie przepływu [m³/h]		Ciśnienie statyczne – wartość średnia dla kondygnacji 1-4 [Pa]		Wartość ciśnienia uzyskana dla kondygnacji 1-4 [Pa]							
						1		2		3		4	
		AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD
1	eksperyment	11 994,4	596,5	13,1	1,6	19,8	2,6	15,0	1,6	11,0	1,2	6,7	0,8
	analiza CFD	12 727,2	-	14,7	-	23,9	-	16,2	-	11,5	-	7,3	-
	różnica [%]	6,1		12,1		20,8		7,6		4,2		9,1	
3	eksperyment	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	analiza CFD	16 040,0	-	22,0	-	34,1	-	24,4	-	18,0	-	11,4	-
	różnica [%]	-		-		-		-		-		-	
4	eksperyment	16 294,8	768,1	27,4	3,0	40,9	3,2	32,4	2,7	23,3	2,2	13,2	1,4
	analiza CFD	17 422,7	-	25,5	-	38,5	-	28,7	-	21,2	-	13,5	-
	różnica [%]	6,9		7,1		6,0		11,4		8,7		2,5	
5	eksperyment	17 658,0	873,7	33,1	3,0	49,5	4,0	39,2	3,5	27,9	2,8	15,7	1,9
	analiza CFD	18 159,5	-	26,0	-	38,8	-	29,5	-	21,8	-	13,9	-
	różnica [%]	2,8		21,4		21,7		24,8		21,9		11,4	
6	eksperyment	17 841,1	811,9	34,2	3,1	50,5	4,2	40,5	3,4	29,0	2,8	17,0	1,9
	analiza CFD	17 537,2	-	25,4	-	37,4	-	29,1	-	21,5	-	13,6	-
	różnica [%]	1,7		25,8		25,8		28,1		25,9		19,8	
7	eksperyment	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	analiza CFD	17 619,2	-	25,6	-	37,2	-	29,7	-	21,9	-	13,8	-
	różnica [%]	-		-		-		-		-		-	

Wykonane analizy numeryczne CFD oraz badania eksperymentalne w warunkach rzeczywistych z wykorzystaniem wentylatora GX 500 w ramach procesu walidacji

wykazały zadowalającą dokładność modelu. Poziom zbieżności parametrów przepływu (różnica procentowa między wartościami natężenia przepływu i ciśnienia uzyskanymi w wyniku badań eksperymentalnych i symulacji CFD) przedstawia się następująco: metoda A: 0,85% (objętościowe natężenie przepływu) i 22,2% (ciśnienie), metoda B: 1,1–8,9% (objętościowe natężenie przepływu) i metoda C: 1,7-6,9% (objętościowe natężenie przepływu) i średnie ciśnienie: 7,1-25,8%. Mając to na uwadze, należy wskazać, że opracowana metoda charakteryzuje się dobrym stopniem zbieżności i może być wykorzystywana jako narzędzie oceny parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne.

12. Propozycje rozwoju metod badawczych – testy wentylatorów pracujących w tandemie [A14]

W ramach prac związanych z eksperymentalną oceną skuteczności działania wentylatorów mobilnych na stanowisku testowym stanowiącym rzeczywisty obiekt budowlany (metoda C) dokonano weryfikacji parametrów przepływu jednostek wentylatorowych pracujących w tandemie. Takie badania mogą być wykonywane dla jednostek ochrony przeciwpożarowej celem określenia parametrów przepływu wentylatorów, które strażacy posiadają na wyposażeniu i są wykorzystywane do oddymiania obiektów budowlanych. Szczegółowy opis techniczny stanowiska badawczego oraz zagadnienia dotyczące częstotliwości akwizycji parametrów i analizy błędów przedstawiono w podrozdziale 7.2.3. Do testów wykorzystano dwa wentylatory typu konwencjonalnego (2) o parametrach przedstawionych w tabeli 1. W trakcie testów dokonano oceny parametrów przepływu dla jednej konfiguracji, w której wentylator pracował indywidualnie, oraz dla dziesięciu konfiguracji, w których wentylatory pracowały w tandemie. Podczas badań urządzenia pracowały z maksymalną prędkością obrotową. Schematy i opis ustawienia badanych konfiguracji przedstawiono na rys. 58–68.



Rys. 58. Schemat pozycjonowania wentylatora w konfiguracji 1 (A – wentylator, B – otwór drzwiowy); konfiguracja obejmowała wykorzystanie jednego wentylatora z uwzględnieniem najkorzystniejszych parametrów pozycjonowania (odległość od otworu drzwiowego: 1 m, kąt nachylenia osi wirnika: 17°); najkorzystniejsze parametry pozycjonowania wentylatora pracującego indywidualnie zostały określone na podstawie badań opisanych w podrozdziale 7.2.3



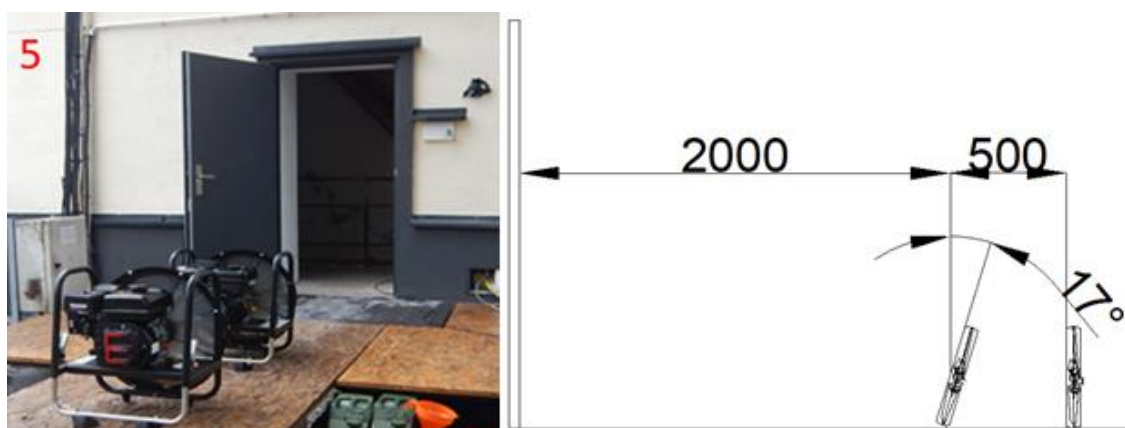
Rys. 59. Schemat pozycjonowania wentylatorów w konfiguracji 2; zastosowano dwie jednostki wentylatorowe (wentylator 1 – odległość od otworu drzwiowego: 1 m, kąt nachylenia osi wirnika: 0° ; wentylator 2 – odległość od wentylatora 1: 0,5 m, kąt nachylenia osi wirnika: 0°)



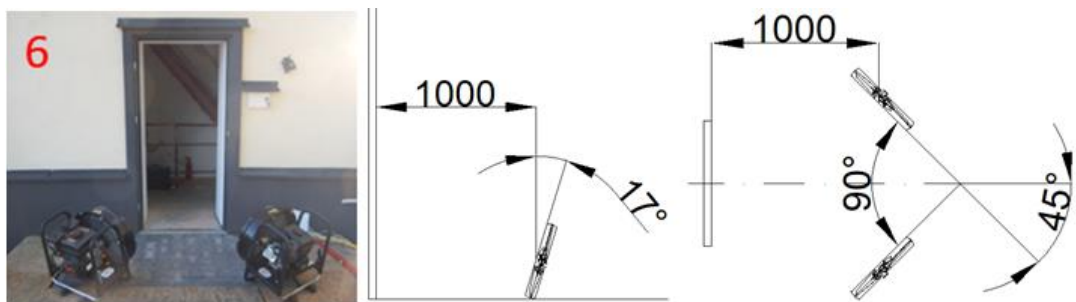
Rys. 60. Schemat pozycjonowania wentylatorów w konfiguracji 3; zastosowano dwie jednostki wentylatorowe (wentylator 1 – odległość od otworu drzwiowego: 1 m, kąt nachylenia osi wirnika: 17° ; wentylator 2 – odległość od wentylatora 1: 0,5 m, kąt nachylenia osi wirnika: 0°)



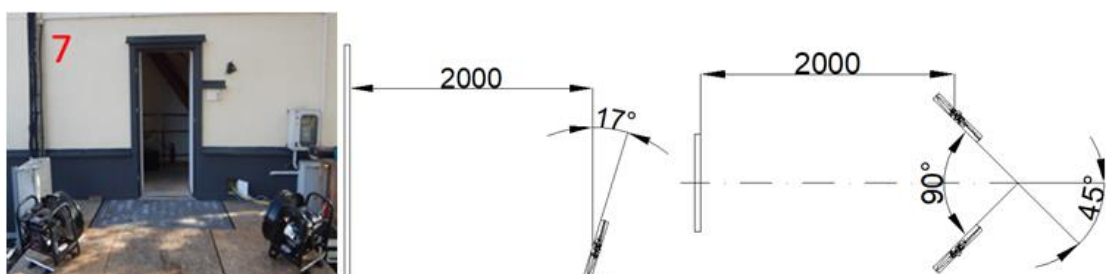
Rys. 61. Schemat pozycjonowania wentylatorów w konfiguracji 4; zastosowano dwie jednostki wentylatorowe połączone szeregowo (wentylator 1 – odległość od otworu drzwiowego: 2 m, kąt nachylenia osi wirnika: 0° ; wentylator 2 – odległość od wentylatora 1: 0,5 m, kąt nachylenia osi wirnika: 0°)



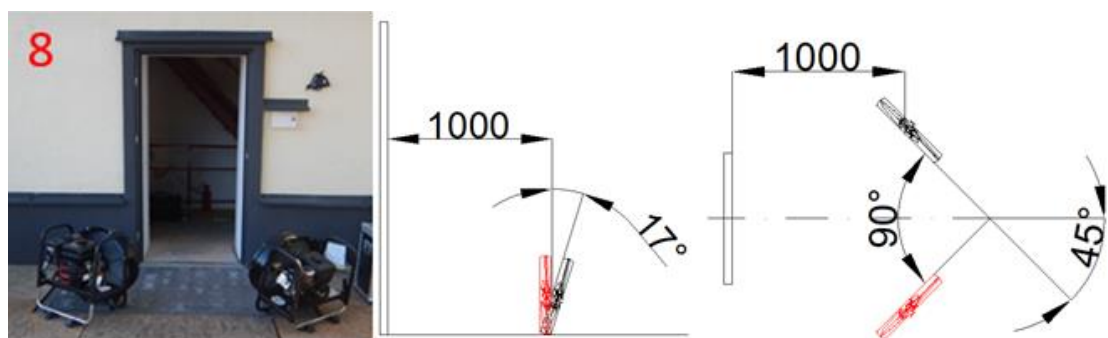
Rys. 62. Schemat pozycjonowania wentylatorów w konfiguracji 5; zastosowano dwie jednostki wentylatorowe połączone szeregowo (wentylator 1 – odległość od otworu drzwiowego: 2 m, kąt nachylenia osi wirnika: 17° ; wentylator 2 – odległość od wentylatora 1: 0,5 m, kąt nachylenia osi wirnika: 0°)



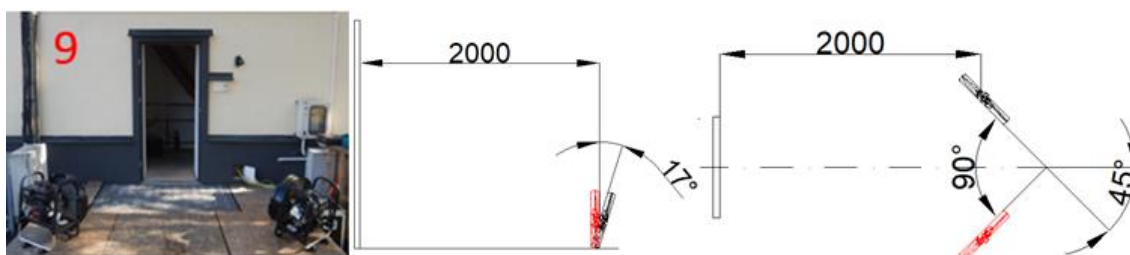
Rys. 63. Schemat pozycjonowania wentylatorów w konfiguracji 6 (konfiguracja „V” – strumienie powietrza nakładają się); zastosowano dwie jednostki wentylatorowe (wentylator 1 i wentylator 2 – odległość od otworu drzwiowego: 1 m, kąt nachylenia osi wirnika: 17°)



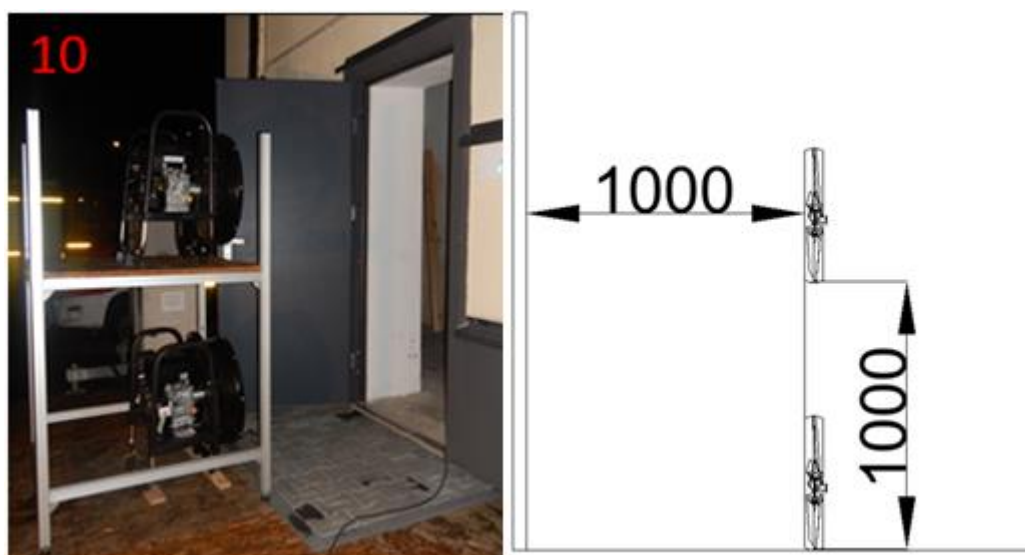
Rys. 64. Schemat pozycjonowania wentylatorów w konfiguracji 7 (konfiguracja „V” – strumienie powietrza nakładają się); zastosowano dwie jednostki wentylatorowe (wentylator 1 i wentylator 2 – odległość od otworu drzwiowego: 2 m, kąt nachylenia osi wirnika: 17°)



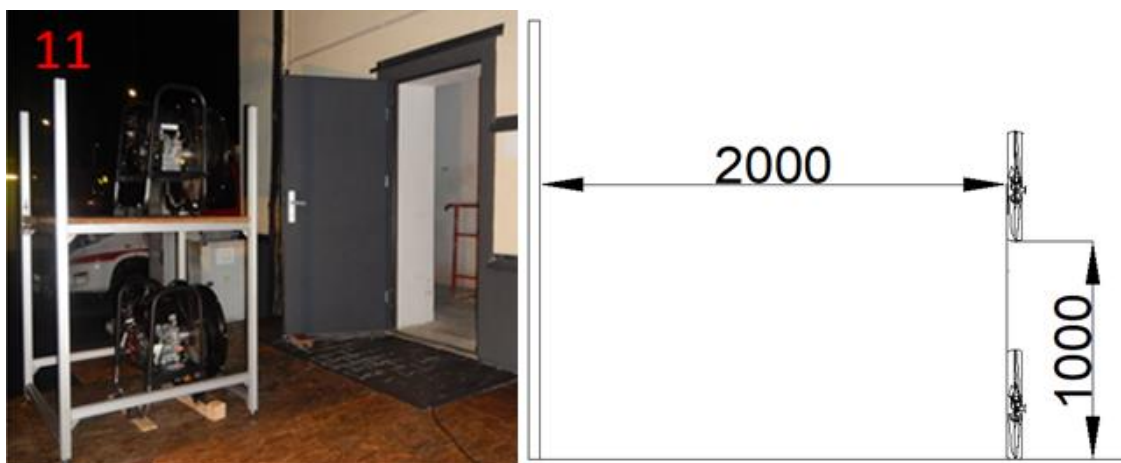
Rys. 65. Schemat pozycjonowania wentylatorów w konfiguracji 8 (konfiguracja „V” – strumienie powietrza mijają się); zastosowano dwie jednostki wentylatorowe (wentylator 1 – odległość od otworu drzwiowego: 1 m, kąt nachylenia osi wirnika: 0°, wentylator 2 – odległość od otworu drzwiowego: 1 m, kąt nachylenia osi wirnika: 17°)



Rys. 66. Schemat pozycjonowania wentylatorów w konfiguracji 9 (konfiguracja „V” – strumienie powietrza mijają się); zastosowano dwie jednostki wentylatorowe (wentylator 1 – odległość od otworu drzwiowego: 2 m, kąt nachylenia osi wirnika: 0° , wentylator 2 – odległość od otworu drzwiowego: 2 m, kąt nachylenia osi wirnika: 17°)

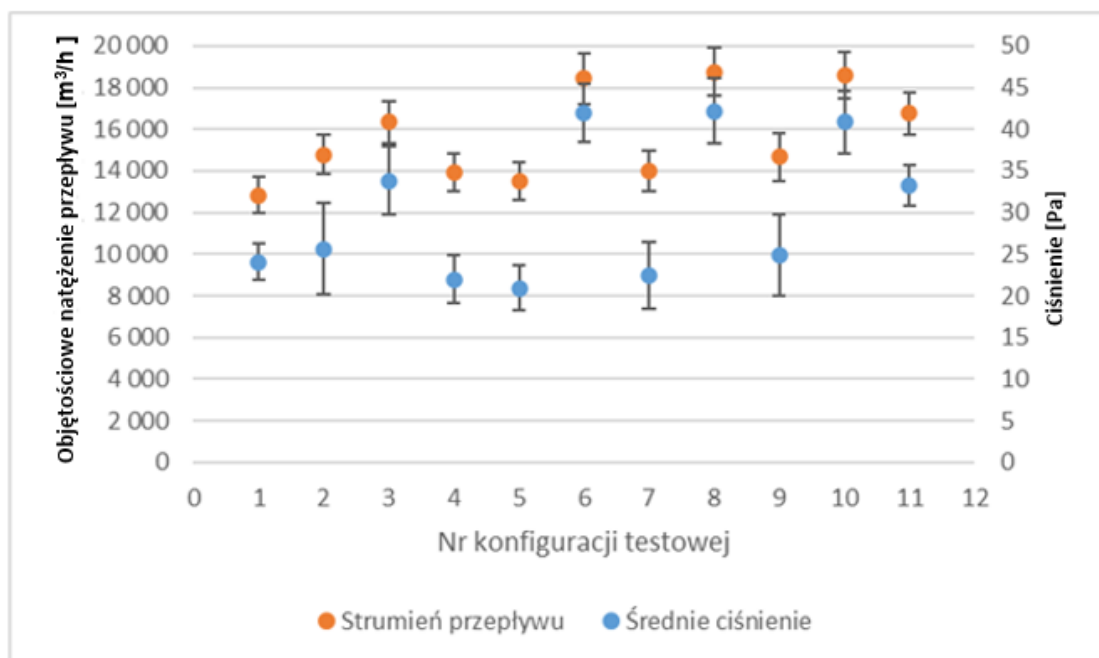


Rys. 67. Schemat pozycjonowania wentylatorów w konfiguracji 10; zastosowano dwie jednostki wentylatorowe ustawione na specjalnym korpusie odsuniętym na odległość 1 m od otworu drzwiowego, z górną płaszczyzną uniesioną na wysokość 1 m (wentylator 1 i wentylator 2 – kąt nachylenia osi wirnika: 0°)



Rys. 68. Schemat pozycjonowania wentylatorów w konfiguracji 10; zastosowano dwie jednostki wentylatorowe ustawione na specjalnym korpusie odsuniętym na odległość 1 m od otworu drzwiowego, z górną płaszczyznę uniesioną na wysokość 1 m (wentylator 1 i wentylator 2 – kąt nachylenia osi wirnika: 0°)

Charakterystykę parametrów przepływu w zależności od zastosowanej konfiguracji wentylatorów przedstawiono na rys. 69.



Rys. 69. Zmiany objętościowego natężenia przepływu oraz ciśnienia statycznego dla jedenastu konfiguracji testowych

Analizując wartości uzyskanych parametrów (objętościowego natężenia przepływu oraz ciśnienia statycznego), wykazano, że najkorzystniejsza jest konfiguracja 8 (zespół wentylatorów pracujących w układzie „V” w odległości 1 m od otworu drzwiowego przy kątach nachylenia osi wirnika 0° i 17°). Wskazany układ przetłaczał powietrze przez kubaturę o natężeniu $18\,743,87\text{ m}^3/\text{h}$ i ciśnieniu $42,21\text{ Pa}$. Ze skutecznością mniejszą o około 2% (natężenie przepływu $18\,450,36\text{ m}^3/\text{h}$) i o 1% (ciśnienie $41,9\text{ Pa}$) pracowały wentylatory ustawione w konfiguracji 6 (układ „V”). W tej konfiguracji oba wentylatory były ustawione w odległości 1 m od otworu drzwiowego i pracowały przy kącie nachylenia osi wirnika 17° (strugi nakładały się). Najmniej skuteczne ustawienie to konfiguracja nr 1 (pojedynczy wentylator ustawiony w odległości 1 m od otworu drzwiowego, kąt nachylenia osi wirnika 17°). Ten wentylator w trakcie testu wytworzył przepływ o natężeniu $12\,823,61\text{ m}^3/\text{h}$ i średnim ciśnieniu $24,07\text{ Pa}$. Wyniki te są zbieżne z rezultatami badań prowadzonych przez Lamberta i Merciego w 2014 r. [4]. Potwierdzili oni, że konfiguracja „V” jest najkorzystniejsza spośród wszystkich przebadanych ustawień. Wspomniani naukowcy badali podobny wentylator, który wytwarzał objętościowe natężenie przepływu $30\,000\text{ m}^3/\text{h}$. W rozważaniach na temat najkorzystniejszych ustawień wentylatorów należy brać pod uwagę również inne konfiguracje. W zależności od przyjętego sposobu prowadzenia mechanicznej wentylacji nadciśnieniowej w trakcie pożaru wewnętrznego w obiekcie budowlanym może zaistnieć sytuacja, w której dane ustawienie wentylatorów nie może zostać zastosowane ze względu na niesprzyjające warunki, np. brak miejsca przed otworem drzwiowym lub konieczność wydzielenia miejsca ze względu na prowadzone działania ratownicze obejmujące ewakuację użytkowników obiektu. W wyniku badań korzystne okazały się również konfiguracje nr 10, 11 i 3. W trakcie badań konfiguracji nr 10 (tandem wentylatorów pracujących w układzie 1 na 2 przy kącie nachylenia osi wirnika 0° , odsuniętych o 1 m od otworu drzwiowego) uzyskano przepływ o natężeniu objętościowym $18\,556,49\text{ m}^3/\text{h}$ i ciśnieniu $40,83\text{ Pa}$ oraz odnotowano zmniejszenie parametrów przepływu o 1% (objętościowe natężenie przepływu) i 3% (ciśnienie statyczne). Korzystne parametry przepływu zarejestrowano też w przypadku konfiguracji nr 3, w której wentylatory pracujące w układzie szeregowym wytworzyły przepływ o natężeniu objętościowym $16\,359,95\text{ m}^3/\text{h}$ oraz ciśnieniu $33,85\text{ Pa}$ (różnica, odpowiednio, 13% i 20%). W wyniku badań można wskazać konfiguracje, które charakteryzują się mniejszą sprawnością (różnica poniżej 25% w przypadku obu parametrów przepływu). Są to konfiguracje nr 4 (gdzie wartości parametrów przepływu były mniejsze o 26% (objętościowe natężenie przepływu) i 48% (ciśnienie statyczne) oraz nr 5 (objętościowe natężenie przepływu mniejsze o 28%, ciśnienie mniejsze o 50%). W obu konfiguracjach zastosowano ustawienie szeregowe w odległości 2 m od otworu

drzwiowego, przy czym wentylator 1 w konfiguracji nr 4 nawiewał strugę powietrza przy kącie nachylenia osi wirnika 0° , a w konfiguracji nr 5 – przy kącie nachylenia osi wirnika 17° . Niska sprawność tłoczenia strugi powietrza wynika stąd, że w badanych wentylatorach strona dolotowa wirnika jest przesłonięta silnikiem, jego akcesoriami i ramą nośną. W efekcie strumień odleglejszego wentylatora nie jest kierowany na wirnik wentylatora 1 i rozbija się o wspomniane elementy, tracąc energię kinetyczną i wywołując przepływ poprzeczny względem kierunku tłoczenia, co ogranicza niemal do zera przyrost efektywności wentylacji w porównaniu z pojedynczym wentylatorem. Takie same wnioski przedstawił również Loughheed z zespołem w 2002 r. [1]. Dużym atutem wykonanych badań, jest to, że uzyskane wartości parametrów przepływu w przypadku badanych konfiguracji wentylatorów pracujących w zestawach są zbliżone (lub równe) w przypadku użycia ich w innych obiektach budowlanych (ze zmiennym układem pomieszczeń). Można to potwierdzić, odwołując się do zasad mechaniki płynów, zgodnie z którymi wentylatory pracujące w wolnym przepływie kumulują swoją pracę w postaci energii kinetycznej strumienia [33]. Takie wentylatory stanowią swego rodzaju układ tłoczący zależny od takich czynników, jak: typ wentylatora, profil prędkości nawiewanej strugi, turbulencja swobodna oraz wpływ dyfuzora (otwór wlotowy – np. drzwiowy), stanowiącego element spiętrzający. Odnosząc się do powyższego, można stwierdzić, że wskazane czynniki (z wyjątkiem otworu spiętrzającego, który może być różny) nie będą ulegać zmianie dla wyznaczonej efektywności pracy jedenastu konfiguracji testowych.

Reasumując wykonane badania pracy wentylatorów w różnych konfiguracjach, należy zauważyć, że zastosowanie dodatkowego wentylatora może znacząco wpłynąć na efektywność odprowadzania gazów pożarowych w trakcie pożaru. Wentylatory pracujące w tandemie powinny zostać również poddawane badaniom w warunkach laboratoryjnych, ponieważ parametry wytworzonego przepływu mogą być znacząco różne w zależności od ustawienia jednostek. W trakcie badań odnotowano, że dodanie drugiego wentylatora sprawia, że wartość natężenia objętościowego wytwarzanego przepływu może wzrosnąć nawet o 32%. Przeprowadzona analiza wykazała również, że wentylatory pracujące w konfiguracjach charakteryzują się najlepszą efektywnością, gdy są ustawione w odległościach nominalnych, czyli takich, które są najkorzystniejsze w warunkach laboratoryjnych. Jednocześnie wentylatory powinny być ustawione tak, by nie przesłaniały sobie wzajemnie strumieni wylotowych. Nieco zaskakujący jest wynik badania konfiguracji nr 10 (wentylatory pracujące jeden na drugim), która nie charakteryzowała się największą efektywnością. Ten układ najlepiej odpowiada geometrii otworu drzwiowego, jednak uzyskane objętościowe natężenie przepływu jest zbliżone do odnotowanego w przypadku konfiguracji „V”. W warunkach prowadzenia

działań ratowniczych budowanie korpusu przeznaczonego do ustawienia wentylatorów jeden na drugim wydaje się nieuzasadnione. Dobór odpowiedniej konfiguracji może skrócić czas oddymiania obiektu i usprawnić ten proces, a co za tym idzie, pozwoli efektywniej wykorzystać energię wentylatorów. Wyniki przedstawionej analizy mogą zostać wykorzystane jako rekomendacja dla jednostek ochrony przeciwpożarowej oraz jako wytyczne ułatwiające wybór odpowiedniego ustawienia z uwzględnieniem warunków panujących w pobliżu otworu wlotowego obiektu budowlanego.

13. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych wyników badań eksperymentalnych i symulacji z wykorzystaniem narzędzi CFD opracowano hybrydową metodę pomiaru parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne. Metoda hybrydowa umożliwia ocenę ciśnienia oraz objętościowego natężenia przepływu powietrza (na podstawie badań w małej skali (metodą X) oraz symulacji CFD) z wykorzystaniem trzech testów badawczych; są to:

- A. badanie zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5801,
- B. badanie charakterystyk profilu prędkości w wolnym przepływie – test opracowany przez National Institute of Standards and Technology,
- C. badania parametrów przepływu w rzeczywistym obiekcie wielokondygnacyjnym.

W ramach wykonanych prac wykazano poziom zbieżności parametrów przepływu, przedstawiony jako procentowa różnica między wartościami objętościowego natężenia przepływu i ciśnienia; różnica ta wynosiła w przypadku metody A 1,4% (objętościowy strumień przepływu) i 17,1% (ciśnienie), w przypadku metody B 1,6–4,8% (objętościowy strumień przepływu), a w odniesieniu do metody C – objętościowy strumień przepływu: 0,4–13%, ciśnienie: 0,6–30,1%. Ważną zaletą opracowanej metody hybrydowej jest możliwość odzwierciedlenia wszystkich zjawisk towarzyszących przepływowi wytwarzanemu przez wentylator (np. ujemnej składowej prędkości powodującej powstawanie obszarów oderwań i lokalnych wirów podciśnienia na ścianach kanału przepływowego – metoda A). Potwierdzeniem prawidłowości hybrydowej metody badawczej jest również przeprowadzony proces walidacji metody. W jego wyniku wykazano poziom zbieżności przedstawiony jako procentowa różnica między wartościami objętościowego natężenia przepływu i ciśnienia – metoda A: 0,85% i 22,2%); metoda B: 1,1–8,9%; metoda C – objętościowy strumień przepływu: 1,7–6,9%, ciśnienie: 7,1–25,8%). Wskazano dwie grupy odbiorców zaprezentowanej metody hybrydowej. Są to producenci wentylatorów mobilnych oraz strażacy ratownicy. Wytwórcy jednostek mobilnych mogą wykorzystać tę metodę do prowadzenia testów technologicznych obejmujących weryfikację parametrów przepływu bez konieczności wykonywania czasochłonnych i kosztownych badań laboratoryjnych, a strażacy z powodzeniem zastosują ją np. do oceny dynamiki oddymiania obiektów i opracowania planów ewakuacji dla obiektów budowlanych. Ponadto w ramach pracy osiągnięte zostały cele dodatkowe, dotyczące identyfikacji geometrycznych parametrów pozycjonowania charakteryzujących się największą efektywnością pod względem uzyskanych parametrów przepływu powietrza dla grupy wentylatorów pracujących zarówno indywidualnie, jak i w zestawach.

W trakcie testów na stanowisku do oceny charakterystyk profilu prędkości w wolnym przepływie (test opracowany przez National Institute of Standards and Technology) badane wentylatory wytworzyły przepływ o natężeniu objętościowym w zakresie od około 18 304 m³/h do 45 189 m³/h. Najkorzystniejsze wartości tego parametru uzyskano, gdy odległość od otworu drzwiowego wynosiła 3-5 m, a kąt nachylenia osi wirnika względem podłoża mieścił się w zakresie 5–12°.

W trakcie testów w wielokondygnacyjnym obiekcie budowlanym (badania wentylatorów typu turbo i konwencjonalnego w odległości 1-7 m od otworu drzwiowego) uzyskano objętościowe natężenie przepływu 8591–15 656 m³/h i ciśnienie 4,6–26 Pa. Badania jednoznacznie wykazały, że wentylatory z wirnikiem konwencjonalnym (2) charakteryzowały się największą efektywnością wentylacji budynku w najmniejszej badanej odległości od otworu drzwiowego (1 m). Wraz ze wzrostem odległości od otworu drzwiowego (do 7 m) wartość ta malała aż do 8591 m³/h. Z kolei w przypadku wentylatora z wirnikiem typu turbo (3) objętościowy strumień przepływu powietrza przez tor wymiany gazowej rósł wraz ze zwiększaniem odległości od otworu drzwiowego (tylko do 5 m).

W ramach niniejszej pracy wykonano również testy parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory pracujące w zestawach. W trakcie badań odnotowano, że dodanie drugiego wentylatora powoduje wzrost objętościowego natężenia przepływu nawet o 32%. Analiza wykazała również, że wentylatory pracujące w konfiguracjach charakteryzują się najlepszą efektywnością, gdy są ustawione w odległościach nominalnych (najkorzystniejszych, określonych w warunkach laboratoryjnych).

Na podstawie badań parametrów pracy jednostek napędowych wykazano, że od warunków badania (kanał rurowy lub wolny przepływ) zależą różnice w zapotrzebowaniu wentylatorów na moc napędową (od 3,2% do 4,5%), które przekładają się na zużycie paliwa oraz emisję szkodliwych gazów wytwarzanych przez spalinowe jednostki napędowe. Ponadto zmiany warunków pracy jednostki napędowej wywołane metodą pomiaru parametrów przepływu powodują zmiany zużycia paliwa (od 0,65% do 9,8%) i emisji szkodliwych składników spalin: CO₂ (do 2,4%), CO (do 67%), HC (do 93,2%) i NO_x (do 37%).

W ramach niniejszej pracy osiągnięto również cele o charakterze wdrożeniowym w zakresie budowy stanowisk badawczych (m.in. tunel aerodynamiczny ANSI/AMCA 240-22) przeznaczony do oceny parametrów przepływu w warunkach laboratoryjnych. W ramach prac rozwojowych planowane są działania nad rozwojem metody hybrydowej przez uwzględnienie dodatkowych metod testowych (tj. badania zgodnego z ANSI/AMCA 240-22 z wykorzystaniem tunelu aerodynamicznego oraz badania uwzględniającego większą liczbę wentylatorów pracujących w zestawach). W przyszłości planowane jest również rozszerzenie badań parametrów pracy jednostek

napędowych i emisji spalin z uwzględnieniem większej grupy wentylatorów i rodzajów jednostek napędowych.

14. Literatura

- [1] Loughheed, G.D., McBride, P.J., Carpenter, D.W. (2002). Positive pressure ventilation for high-rise buildings. National Research Council Canada, Institute for Research in Construction.
- [2] Ezekoye, O.A., Svensson, S., Nicks, R. (2007). Investigating positive pressure ventilation. In: Proceedings of 11th International Fire Science & Engineering Conference (Interflam'07), 3rd–5th September, interscience communications, London.
- [3] Kerber, S., Kerber, S., Madrzykowski, D. (2007). Evaluating positive pressure ventilation in large structures: High-rise fire experiments. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
- [4] Lambert, K., Merci, B. (2014). Experimental study on the use of positive pressure ventilation for fire service interventions in buildings with staircases. „Fire Technology”, 50(6), 1517-1534.
- [5] Panindre, P., Mousavi, N.S., Kumar, S. (2017). Positive pressure ventilation for fighting wind-driven high-rise fires: simulation-based analysis and optimization. „Fire Safety Journal”, 87, 57-64.
- [6] Panindre, P., Mousavi, N.S., Kumar, S. (2017). Improvement of Positive Pressure Ventilation by optimizing stairwell door opening area. „Fire Safety Journal”, 92, 195-198.
- [7] Lambert, K., Welch, S., Merci, B. (2018). The use of positive pressure ventilation fans during firefighting operations in underground stations: an experimental study. „Fire Technology”, 54(3), 625-647.
- [8] Le Corré, F. (2001). Ventilation dans les incendies appliqué au métro Parisien. ENSAM Paris, France.
- [9] Jiang, L., Ingason, H. (2020). Use of mobile fans during tunnel fires. „Tunnelling and Underground Space Technology”, 106, 103618.
- [10] Kumm, M., Bergqvist, A. (2008). Mobile Ventilation as a Tactic Resource at Tunnel Fires. In: ISTSS-Third International Symposium on Tunnel Safety and Security. Stockholm, Sweden, March 12-14, 289-300.
- [11] Ding, Y. et al. (2023). Study of temperature distribution and smoke movement by mobile ventilation during emergency rescue in tunnel fires. „Thermal Science and Engineering Progress”, 46, 102254.
- [12] Ingason, H. (2002). Use of mobile fans in tunnels (technical report no. SP-RAPP-2002-06).

- [13] Ingason, H., Li, Y. Z., Lönnemark, A., (2015). Tunnel fire ventilation. Tunnel fire dynamics, 333-369.
- [14] Ying, H. et al. (2024). Full-scale experiment on the ventilation performance of vehicle-mounted mobile fans in a road tunnel. „Tunnelling and Underground Space Technology”, 148, 105737.
- [15] PN-EN 5801:2017-12. Wentylatory – Badanie właściwości użytkowych z zastosowaniem stanowisk znormalizowanych.
- [16] Bleier, F.P. (2018). Fan handbook: selection, application, and design. McGraw-Hill.
- [17] Cimolino, U., Emrich, C., Svensson, S. (2012). Taktische Ventilation: Be-und Entlüftungssysteme im Einsatz. ecomed-Storck GmbH.
- [18] ISO 5221:1984. Air Distribution and Air Diffusion – Rules to Methods of Measuring Air Flow Rate in an Air Handling Duct.
- [19] Alonso, J.S.J. et al. (2022). Analysis and assessment of factors affecting air inflow from areas adjacent to operating rooms due to door opening and closing. „Journal of Building Engineering”, 49, 104109.
- [20] Kerber, S., Walton, W.D. (2003). Characterizing positive pressure ventilation using computational fluid dynamics. Gaithersburg, MD, USA: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
- [21] Garcia K., Kauffmann R., Schelble R. (2006). Positive pressure attack for ventilation & firefighting, PennWell Books.
- [22] Kerber, S., Walton, W.D. (2003). Characterizing positive pressure ventilation using computational fluid dynamics. Gaithersburg, MD, USA: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
- [23] Kaczmarzyk, P. et al. (2022). Possibilities of using mobile fans and the parameters conditioning the effectiveness of tactical mechanical ventilation. „Safety & Fire Technology”, 59.
- [24] Achakji G.Y., Tamura G.T. (1988). Pressure drop-characteristics of typical stairshaft in highrise buildings, „ASHRAE Transactions”, 94, s. 45-50
- [25] Panindre, P. et al. (2018). Positive pressurization and ventilation for fighting fires in high-rise structures with multiple stairwells. „Journal of Physics: Conference Series”, 1107, 4, 042037.
- [26] Kaczmarzyk, P. et al. (2021). Identification and evaluation of technical and operational parameters of mobile positive pressure ventilation fans used during rescue operations. „Safety & Fire Technology”, 58, 74-91.
- [27] ANSI/AMCA Standard 240-22. Laboratory Methods of Testing Positive Pressure Ventilators for Aerodynamic Performance Rating.

- [28] Bugaj, G. (2013). Wentylacja nadciśnieniowa (cz. 1). „Przegląd Pożarniczy”, 12, 27-31.
- [29] Kokot-Góra, S. (2014). Poznaj swoje narzędzia pracy (cz. 1). „Przegląd Pożarniczy”, 8, 16.
- [30] Kerber, S., Walton, W.D. (2005). Effect of positive pressure ventilation on a room fire. Gaithersburg: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
- [31] Łapicz, M., Makowski, R., Jędrzejak, J. (2018). Increased effectiveness of firefighting during internal fires with the use of positive pressure attack. In: MATEC Web of Conferences, Vol. 247, 00036). EDP Sciences.
- [32] Kuti, R., Zólyomi, G., Kegyes-Brassai, O.K. (2018). Assessing the impact of positive pressure ventilation on the building fire – A case study. „GEOMATE Journal”, 15(48), 16-21.
- [33] Kreith, F. (red.) (1999). Fluid mechanics. CRC Press.
- [34] DIN 14963:2021-09 Feuerwehrwesen – Tragbare Belüftungsgeräte.
- [35] Warguła, Ł. et al. (2022). Energy consumption of the wood size reduction processes with employment of a low-power machines with various cutting mechanisms. „Renewable Energy”, 181, 630-639.
- [36] Kukła, M. et al. (2021). An analytical modelling of demand for driving torque of a wheelchair with electromechanical drive. „Energies”, 14(21), 7315.
- [37] Rymaniak, Ł. et al. (2020). The role of real power output from farm tractor engines in determining their environmental performance in actual operating conditions. „Computers and Electronics in Agriculture”, 173, 105405.
- [38] Lijewski, P. et al. (2017). Exhaust emissions from small engines in handheld devices. In: MATEC Web of Conferences, Vol. 118, 00016. EDP Sciences.
- [39] Fritsche, M., Epple, P., Delgado, A. (2018). Development of a measurement method for the classification and performance evaluation of positive pressure ventilation (PPV) fans. In: Fluids Engineering Division Summer Meeting, Vol. 51579, V003T12A021. American Society of Mechanical Engineers.
- [40] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/1628 z dnia 14 września 2016 r. w sprawie wymogów dotyczących wartości granicznych emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych oraz homologacji typu w odniesieniu do silników spalinowych wewnętrznego spalania przeznaczonych do maszyn mobilnych nieporuszających się po drogach, zmieniające rozporządzenia (UE) nr 1024/2012 i (UE) nr 167/2013 oraz zmieniające i uchylające dyrektywę 97/68/WE.
- [41] Warguła, Ł., Lijewski, P., Kukła, M. (2022). Influence of non-commercial fuel supply systems on small engine SI exhaust emissions in relation to European approval

- regulations. „Environmental Science and Pollution Research”, 29(37), 55928-55943.
- [42] Waluś, K.J. et al. (2018). Legal regulations of restrictions of air pollution made by non-road mobile machinery – The case study for Europe: A review. „Environmental Science and Pollution Research”, 25, 3243-3259.
 - [43] Leach, F. et al. (2020). The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. „Transportation Engineering”, 1, 100005.
 - [44] Sheykhi, M. et al. (2020). Investigation of the effects of operating parameters of an internal combustion engine on the performance and fuel consumption of a CCHP system. „Energy”, 211, 119041.
 - [45] Warguła, Ł., Lijewski, P., Kukla, M. (2023). Effects of changing drive control method of idling wood size reduction machines on fuel consumption and exhaust emissions. „Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering”, 44(1), 137-151.
 - [46] Homdoun, N., Tippayawong, N., Dussadee, N. (2015). Performance and emissions of a modified small engine operated on producer gas. „Energy Conversion and Management”, 94, 286-292.
 - [47] Munsin, R. et al. (2013). An experimental study on performance and emissions of a small SI engine generator set fuelled by hydrous ethanol with high water contents up to 40%. „Fuel”, 106, 586-592.
 - [48] Warguła, Ł., Lijewski, P., Kukla, M. (2022). Influence of non-commercial fuel supply systems on small engine SI exhaust emissions in relation to European approval regulations. „Environmental Science and Pollution Research”, 29(37), 55928-55943.
 - [49] Warguła, Ł.; Dobrzyński M.; Kaczmarzyk P.; Markiewicz F.; Wieczorek B.; Dimitrov D.; Lijewski P. The concentration of CO₂, CO, CH, NO_x, and PM₁₀ in the exhaust gases of combustion engines driving positive pressure fans, 13th International Conference on Mechanical Technologies and Structural Materials, MTSM 2024, 19-20.09.2024, Split, Croatia p. 409-420.
 - [50] Warguła, Ł.; Kaczmarzyk, P.; Wieczorek, B.; Gierz, Ł.; Małozieć, D.; Góral, T.; Kostov, B.; Stambolov, G. Identification of the Problem in Controlling the Air–Fuel Mixture Ratio (Lambda Coefficient λ) in Small Spark-Ignition Engines for Positive Pressure Ventilators. *Energies* 2024, 17, 4241.
 - [51] Fortuna, S. (1999). Wentylatory: podstawy teoretyczne, zagadnienia konstrukcyjno-eksploatacyjne i zastosowanie. Techwent.
 - [52] ANSI/AMCA Standard 210-16 / ASHRAE 51-16 Laboratory Methods of Testing Fans for Certified Aerodynamic Performance Rating.

- [53] Mahalingam, A., Patel, M.K., Galea, E.R. (2010). Simulation of the flow induced by positive pressure ventilation fan under wind driven conditions. In: Proceedings of Interflam, Vol. 1, 913-924).
- [54] McGrattan, K. et al. (2013). Fire dynamics simulator user's guide. „NIST Special Publication”, 1019(6), 1-339.
- [55] Deardorff, J.W. (1980). Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. „Boundary-Layer Meteorology”, 18, 495-527.
- [56] McGrattan, K.B., Hamins, A., Stroup, D.W. (1998). Sprinkler, smoke & heat vent, draft curtain interaction: large scale experiments and model development. Gaithersburg, MD, USA: NIST, 101.
- [57] NIST (2013). Special Publication 1019. Sixth Edition Fire Dynamics Simulator User's Guide.
- [58] Ingason, H., & Fallberg, R. (2002). Positive pressure ventilation in single medium-sized premises. *Fire technology*, 38, 213-230.
- [59] Li, M., Gao, Z., Ji, J., & Li, K. (2018). Modeling of positive pressure ventilation to prevent smoke spreading in sprinklered high-rise buildings. *Fire safety journal*, 95, 87-100.

15. Syntetyczne ujęcie wkładu w rozwój dyscypliny naukowej – inżynieria mechaniczna

W rozprawie przedstawiono następujące autorskie wyniki prac stanowiące uzupełnienie wiedzy w dyscyplinie inżynieria mechaniczna:

- 1) hybrydowa metoda oceny parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne (połączenie badań w małej skali oraz symulacji CFD), polegająca na umożliwieniu oceny parametrów przepływu z użyciem trzech metod:
 - badania zgodnego z normą PN-EN ISO 5801,
 - badania charakterystyk profilu prędkości w wolnym przepływie – test opracowany przez National Institute of Standards and Technology,
 - badania parametrów przepływu w rzeczywistym wielokondygnacyjnym obiekcie budowlanym;
- 2) wyznaczanie efektywności badanych wentylatorów w zależności od ich pozycjonowania na podstawie pomiarów objętościowego natężeniu przepływu i ciśnienia w rzeczywistym obiekcie budowlanym;
- 3) przygotowanie modelu CFD obiektu budowlanego, przeznaczonego do oceny parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylator mobilny z uwzględnieniem przeszkód, zmiennej liczby kondygnacji oraz nietypowych materiałów wykończenia wnętrza;
- 4) uzupełnienie stanu techniki o prototypowe stanowiska do oceny parametrów przepływu wytwarzanego przez wentylatory mobilne:
 - stanowisko badawcze zgodne z PN-EN ISO 5801,
 - stanowisko badawcze do oceny charakterystyk profilu prędkości w wolnym przepływie (testy na makiecie),
 - stanowisko badawcze do oceny parametrów przepływu w wielokondygnacyjnym obiekcie budowlanym oraz stanowisko testowe wykonane zgodnie z wymaganiami ANSI/AMCA 240-22 (tunel aerodynamiczny).

16. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

16.1. Otrzymane nagrody

W uznaniu zaangażowania w prace nad omawianym doktoratem wdrożeniowym otrzymałem Dyplom Komendanta Głównego Państwowej Straży Pożarnej „Zasłużony dla ochrony przeciwpożarowej” za osiągnięcia związane z prowadzeniem badań techniczno-użytkowych wentylatorów mobilnych stosowanych przez jednostki ochrony przeciwpożarowej (Warszawa, 4 maja 2022 r.).

16.2. Projekty i wewnętrzne prace badawcze

Udział w projektach zewnętrznie finansowanych (NCBR):

1. Projekt pt. „Sterowanie autonomicznym dronem za pomocą gogli (monookularu)” (07/2020-04-2021); charakter udziału i obowiązki: kluczowy wykonawca B+R w zakresie realizacji testów klimatycznych pozwalających potwierdzić poprawność działania urządzenia w zmiennych warunkach środowiskowych (nr umowy: DOB-BIO9/26/04/2018)
2. Projekt pt. „Innowacyjne stanowisko badawczo-treningowe – Trenażer LNG” służące do opracowania taktyki działań z wykorzystaniem sprzętu będącego na wyposażeniu PSP podczas zdarzeń LNG (07/2020-09/2020); charakter udziału i obowiązki: kluczowy wykonawca B+R w zakresie opracowania scenariuszy ćwiczeń pozwalających odzwierciedlić zagrożenia związane ze zjawiskami pożarowymi, jakie mogą wystąpić podczas eksploatacji medium LNG, na potrzeby szkoleń strażaków-ratowników” (nr umowy: DOB-BIO9/15/02/2018)

Udział w pracach badawczych wewnętrznych finansowanych przez MNiSW:

1. Badania elementów składowych systemów oddymiających i zapobiegających zadymieniu (nr 068/BW/CNBOP-PIB/MNiSW); charakter udziału: kierownik pracy badawczej;
2. Badania i ocena zagrożeń w trakcie cyklu użytkowania układów magazynowania energii elektrycznej wielokrotnego ładowania (nr 089/BW/CNBOP-PIB/MNiSW); charakter udziału: wykonawca;
3. Badanie parametrów wybuchowości substancji palnych (nr 058/BW/CNBOP-PIB/MNiSW); charakter udziału: wykonawca;

4. Badania narzędzi hydraulicznych (nr 081/BW/CNBOP-PIB/MNiSW); charakter udziału: wykonawca;
5. Badanie zagrożeń pożarowych od kabli elektrycznych i światłowodowych w transporcie i budownictwie (nr 093/BW/CNBOP-PIB/MNiSW); charakteru udziału: wykonawca;
6. Badania reakcji na ogień wyrobów budowlanych, wyposażenia wnętrz i kabli (nr 025/BW/CNBOP-PIB/MNiSW); charakter udziału: główny wykonawca.

17. Zbiorcze zestawienie osiągnięć naukowo-badawczych

Zestawienie dorobku naukowego z okresu studiów doktoranckich:

Wykaz osiągnięć, w zestawieniu sumarycznym, w tym dodatkowa działalność naukowa	Punkty
Liczba artykułów zestawionych w bazie Journal Citation Reports®	13
Liczba artykułów innych niż zestawione w bazie Journal Citation Reports®	13
Kierownik projektów badawczych	1
Wykonawca projektów badawczych	6
Wygłoszone referaty na konferencjach naukowych	2
Nagrody i wyróżnienia za działalność naukową i wynalazczą	1
Szkolenia	5
Członkostwo w komitetach normalizacyjnych	1
Liczba cytowań – baza Scopus	81
Index Hirscha – baza Scopus	5
Sumaryczny Impact Factor dla wszystkich publikacji naukowych	39,125
Sumaryczny Impact Factor dla publikacji wpisanych w obszar rozprawy doktorskiej	25,4
Liczba punktów MNiSW dla wszystkich publikacji naukowych	1726
Liczba punktów MNiSW dla publikacji wpisanych w obszar rozprawy doktorskiej	1070
Liczba punktów MNiSW dla publikacji wpisanych w obszar rozprawy doktorskiej (udział własny)	499

Szczegółowe zestawienie danych naukometrycznych zostało przedstawione w analizie przygotowanej przez Oddział Informacji Naukowej Politechniki Poznańskiej – Załącznik nr 3.