

dr inż. Bartłomiej Sędlak^{1*)}

ORCID: 0000-0002-4715-6438

mgr inż. Marzena Jakimowicz²⁾

ORCID: 0000-0002-8173-3585

mgr inż. Artur Frączek¹⁾

ORCID: 0000-0003-4826-2010

dr inż. Krzysztof Kuczyński³⁾

ORCID: 0000-0001-9243-2529

The influence of the door threshold solution and installation accuracy on the smoke tightness of aluminium glazed fire door

Wpływ rozwiązania progowego oraz dokładności montażu na dymoszczelność drzwi przeciwpożarowych

DOI: 10.15199/33.2025.11.09

Abstract. Toxic smoke represents the most frequent cause of human fatalities in fire incidents. Therefore, it is crucial to design proper evacuation routes in buildings which one of the components are fire doors characterized by appropriate fire resistance and smoke containment classification. Achieving the required smoke containment class for fire doors primarily depends on effectively sealing gaps between movable door leaves, frames, and thresholds. For threshold edges, the most common solutions involve either special drop-down seals or properly profiled thresholds equipped with compression gaskets. In both cases, installation precision is paramount. The purpose of this study was to analyze the impact of threshold solution type and gap widths between door leaves, frames, and thresholds on door smoke containment performance.

Keywords: fire doors, smoke control, fire safety, assembly accuracy.

Streszczenie. Toksyczny dym jest najczęstszą przyczyną śmierci ludzi w przypadku wystąpienia pożaru. Bardzo istotne jest więc zaprojektowanie w budynku odpowiednich dróg ewakuacyjnych, których jednym ze składowych elementów są drzwi przeciwpożarowe, charakteryzujące się odpowiednią odpornością ogniową i klasą dymoszczelności. W celu osiągnięcia odpowiedniej klasy dymoszczelności drzwi przeciwpożarowych najistotniejsze jest zabezpieczenie szczelin pomiędzy ruchomymi elementami skrzydła a ościeżnicą oraz progiem. W przypadku krawędzi progowej najczęściej stosowane rozwiązania polegają na zastosowaniu specjalnej uszczelki opadającej lub na wykonaniu odpowiednio wyprofilowanego progu wyposażonego w uszczelkę dociskową. W obu przypadkach ogromne znaczenie ma dokładność montażu. Celem zaprezentowanych badań było przeanalizowanie wpływu rodzaju zastosowanego rozwiązania progowego oraz szerokości szczelin pomiędzy skrzydłem a ościeżnicą i progiem na dymoszczelność drzwi.

Słowa kluczowe: drzwi przeciwpożarowe; dymoszczelność; bezpieczeństwo pożarowe; dokładność montażu.

Fire is a combustion process that spreads uncontrollably, causing material losses and posing a threat to human and animal life and health. The phenomenon is characterised by the potential for high temperatures and the emission of high volumes of combustion products, which are often toxic compounds. Interestingly, the most frequent cause of human death in a fire is toxic smoke rather than direct exposure to fire. In a smoke-polluted environment, one can easily lose orientation, which significantly hinders evacuation from a burning building. Moreover, low oxygen levels and toxic gases produced during combustion may lead to unconsciousness and ultimately death. Therefore, it is crucial to design proper evacuation routes in buildings that remain smoke-free during the required

Pożar definiowany jest jako proces spalania rozprzestrzeniający się w sposób niekontrolowany i powodujący straty materialne oraz zagrożenie dla życia i zdrowia ludzi oraz zwierząt. Zjawisko to charakteryzuje się możliwością występowania wysokiej temperatury oraz wydzielaniem się dużej ilości produktów spalania, będących często toksycznymi związkami. Co ciekawe, to nie bezpośrednie oddziaływanie ognia, lecz toksyczny dym jest najczęstszą przyczyną śmierci ludzi w przypadku wystąpienia pożaru. W zadymionym środowisku można bardzo łatwo stracić orientację, co utrudnia ewakuację z płonącego budynku, a mała zawartość tlenu oraz toksyczne gazy powstające podczas procesu spalania doprowadzić mogą do utraty przytomności i w konsekwencji do śmierci. Bardzo istotne jest więc zaprojektowanie odpowiednich dróg ewakuacyjnych w budynku, które będą wolne od dymu w czasie niezbędnym do jego opuszczenia przez przebywające osoby. Jednym z elementów składowych stosowanych w rozwiązaniach dróg ewakuacyjnych są drzwi przeciwpożarowe, które oprócz właściwości związanych z odpornością ogniową mają

¹⁾ Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Badań Ogniowych

²⁾ Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Inżynierii Elementów Budowlanych

³⁾ Instytut Techniki Budowlanej

*) Correspondence address: b.sedlak@itb.pl

evacuation period. Fire doors are key components of such evacuation systems, offering fire resistance and adequate smoke-control ratings. They are primarily applied in public buildings, including shopping malls, cinemas, schools and hospitals [1, 2], high-rise and super-high-rise buildings [3–5], as well as in special-purpose structures, such as tunnels [6] or shelters [7, 8]. They are also installed in standard residential buildings. In case of fire, their primary task is to facilitate the effective evacuation of users and ensure the safety of rescue teams.

Sealing the gap between the door leaf edges and the door frame and/or adjacent door leaf (for a double-leaf door) and the threshold edge is the most crucial aspect that determines achieving an adequate smoke-tightness rating of a fire door. The spaces at the door lock, hinge and lintel edges are typically sealed with compression gaskets mounted on the door leaf or frame. The most popular solutions for the threshold edge involve using a dedicated drop seal or making an adequately profiled threshold and protecting the gap similarly to other edges – by using a compression gasket. Installation precision plays a significant role in both cases.

Even a seemingly minor change in the gap dimensions between the door leaf and frame or threshold can significantly affect hot smoke leakage through the door assembly. The purpose of this study was to analyse the impact of a threshold solution type and gap widths between door leaves, frames, and thresholds on the door smoke control performance.

Smoke spreading during fire in an enclosed space has been broadly investigated over recent decades [9–15]. Many experimental and analytical studies have been carried out to verify the air or smoke leakage through various configurations of openings and their closures in referenced partitions [16–19]. The tests, however, assumed that the closures of the partition openings remained open. Only a few studies focused on smoke release when the fire door was closed. Paper [20] deserves special attention, as it presents a numerical analysis of smoke leakage through door threshold gaps of varying dimensions (3 mm to 10 mm). Bigger gaps in doors revealed lower resistance to hot gases and smoke spreading, and allowed higher temperatures to permeate through the gaps. The tests performed did not account for gaps on other edges and assumed a fully open door threshold gap (with no sealing applied).

Paper [21] presents a comparison of air leakage through the gaps of fire doors tested for smoke control characteristics across various door threshold solutions. The authors of the referenced paper observed that air leakage through the tested item was much lower with the solution that included a threshold and compression gasket than with the drop seal. In the authors' opinion, a higher leakage rate for the drop seal could be attributed to the roughness of the mounting structure surface ("floor"), preventing complete sealing of the gap along the door leaf's bottom edge. In the current tests, a cardboard plaster panel was used along the bottom edge of the door to prevent a similar phenomenon.

również odpowiednią klasę dymoszczelności. Zastosowanie znajdują przede wszystkim w budynkach użyteczności publicznej, takich jak galerie handlowe, kina, szkoły czy szpitale [1, 2], budynkach wysokich i wysokościowych [3–5], w budowlach o specjalnym przeznaczeniu, do których należą np. tunele [6] czy schrony [7, 8], ale także w budynkach mieszkalnych. W przypadku wystąpienia pożaru ich głównym zadaniem jest umożliwienie sprawnej ewakuacji użytkowników oraz zapewnienie bezpieczeństwa ekipom prowadzącym akcję ratowniczą.

W celu osiągnięcia odpowiedniej klasy dymoszczelności drzwi przeciwpożarowych najistotniejsze jest odpowiednie doszczelnienie przestrzeni pomiędzy krawędziami skrzydła a ościeżnicą i/lub sąsiadującym skrzydłem (w przypadku drzwi dwuskrzydłowych) oraz krawędzi progowej. Przestrzenie na krawędzi zamkowej, zawiasowej i nadprożowej uszczelnione są zazwyczaj przy użyciu uszczelki dociskowej, zamocowanych w skrzydle lub ościeżnicy. W przypadku krawędzi progowej najczęściej stosowane rozwiązania polegają na zastosowaniu specjalnej uszczelki opadającej lub na wykonaniu odpowiednio wyprofilowanego progu oraz zabezpieczeniu szczeliny w sposób podobny do pozostałych krawędzi, tzn. przez użycie odpowiedniej uszczelki dociskowej.

W obu przypadkach ogromne znaczenie ma także dokładność montażu. Nawet pozornie niewielka zmiana szczelin pomiędzy skrzydłem a ościeżnicą czy krawędzią progową może w istotny sposób wpłynąć na przepływ gorącego dymu przez zamknięcie otworu. Celem podjętych badań było przeanalizowanie wpływu rodzaju zastosowanego rozwiązania progowego oraz szerokości szczelin pomiędzy skrzydłem a ościeżnicą i progiem na dymoszczelność drzwi.

Rozprzestrzenianie się dymu podczas pożaru w pomieszczeniu zamkniętym było dokładnie badane w ostatnich dekadach [9–15]. Przeprowadzono także wiele badań eksperymentalnych i analitycznych w celu zweryfikowania przepływu powietrza lub dymu przez różne konfiguracje otworów i ich zamknięć występujących w danych przegrodach [16–19]. W przeprowadzonych badaniach zakładano jednak, że zamknięcia otworów występujących w przegrodach pozostają w pozycji otwartej. Badania skupiające się na dymie w przypadku, gdy drzwi przeciwpożarowe są zamknięte, są nieliczne. Wśród nich na szczególną uwagę zasługuje praca [20], w ramach której przeprowadzono analizę numeryczną przepływu dymu przez szczelinę progową drzwi o różnych wymiarach (3–10 mm). Większe szczeliny w drzwiach wykazały mniejszy opór w przypadku gorących gazów i rozprzestrzeniania się dymu. Przeprowadzone badania nie uwzględniały jednak szczelin na pozostałych krawędziach oraz zakładały w pełni otwartą szczelinę progową (bez uszczelnienia).

W publikacji [21] zaprezentowano porównanie prędkości przepływu powietrza przez szczeliny drzwi przeciwpożarowych poddanych badaniu dymoszczelności, w przypadku różnych rozwiązań progowych drzwi. Autorzy pracy zaobserwowali, że zdecydowanie mniejszą prędkość przepływu powietrza przez element próbny zarejestrowano w przypadku zastosowania rozwiązania z progiem oraz uszczelką dociskową niż w przypadku uszczelki opadającej. Zdaniem autorów większy strumień przepływu w przypadku uszczelki opadającej mógł być spowodowany nierównościami w „posadzce” konstrukcji

Except for the publications above, papers on the smoke control characteristics of doors primarily focus on presenting testing procedures and classification methods. A detailed description of both issues can be found in [6, 22, 23]. Special attention should be paid to paper [24] describing the smoke-tightness testing methodology for doors installed in the existing building structures. As part of the study, a dedicated device was developed to measure smoke leakage (at normal and elevated temperatures) through a door installed in a building. The obtained test results did not deviate significantly from those of the laboratory tests, which – in the authors' opinion – confirmed the possibility of using their original method and testing device to evaluate the smoke tightness of doors in existing building structures.

Materials and methods

Four single-leaf, side-hung, glazed aluminium doors were selected for the tests. The test items had a fully glazed design, with no cross-bars. The door's outer dimensions were 1,120 x 2,100 mm (width x height), while the door leaf's dimensions were 1,018 x 2,036 mm for a solution with a threshold, and 1,018 x 2,044 mm for a solution with a drop seal. The door leaf stile and rails, and the door jambs and lintel were made of identical three-chamber aluminium profiles. The profile, with cross-section dimensions of 46.0 x 80.0 mm, was made from two aluminium shapes connected by a glass fibre-reinforced polyamide thermal insert. The door was glazed with an 8 mm thick tempered glass pane. The glazing was fixed to the profiles with steel shapes covered with an aluminium glazing bead. The door featured three triple-wing hinges, three interlocking door bolts, a three-point lock interacting with a panic bar, and an overhead door closer. Each tested door assembly was mounted using steel door frame screws in a susceptible mounting structure made of cardboard plaster panels fixed to a steel grid.

The gaps between the tested door frame and the mounting structure were tightly filled with polyurethane foam and sealed with silicone. Two specimens featured drop seals fixed to the door leaf bottom profile (specimens 1 and 3), while the other two specimens featured a 20 mm high aluminium threshold along the bottom edge (specimens 2 and 4).

Specimens 1 and 3 were tested first. Then, the door was removed, and a door with an identical structure was mounted instead. However, in order to simulate an imprecise installation, other gap values between the door leaf and frame and the door threshold edge were used. Previous result analyses focused on the influence of the applied threshold solution on smoke tightness. The test programme was designed to capture the influence of potential installation drawbacks on the door's ability to maintain its smoke-tightness. A literature analysis revealed that such an approach had not been used before.

The mean gap values for the door with the drop seal were 8.0 mm and 9.1 mm, for specimens 1 and 3, respectively. For

mocującej, z powodu których uszczelka nie była w stanie całkowicie doszczelnić przestrzeni wzdłuż dolnej krawędzi skrzydła. W ramach obecnie prowadzonych badań zastosowano płytę gipsowo-kartonową w celu uniknięcia podobnego zjawiska wzdłuż dolnej krawędzi drzwi.

Poza przywołanymi pracami, publikacje związane z dymoszczelnością drzwi dotyczą procedur badawczych oraz metod klasyfikacji. Szczegółowy opis obu zagadnień odnaleźć można w [6, 22, 23]. Na szczególną uwagę zasługuje publikacja [24], w której przedstawiono metodę badania dymoszczelności drzwi zamontowanych w istniejących obiektach budowlanych. W ramach pracy wykonano specjalne urządzenie umożliwiające pomiar przepływu dymu (w temperaturze normalnej oraz podwyższonej) przez drzwi zamontowane w budynku. Wyniki badań nie odbiegały od uzyskanych w laboratorium, co w ocenie autorów potwierdziło możliwość stosowania opracowanej przez nich metody oraz urządzenia do oceny dymoszczelności drzwi w istniejących obiektach budowlanych.

Materiały i metody

Do badania dymoszczelności wytypowano cztery rozwierane, jednoskrzydłowe, przeszklone drzwi aluminiowe. Elementy próbne wykonane były jako w pełni przeszklone, bez zastosowanej poprzeczki podziałowej. Wymiary zewnętrzne ościeżnicy drzwi wynosiły 1120 x 2100 mm (szerokość x wysokość), a wymiary skrzydła drzwiowego 1018 x 2036 mm w przypadku rozwiązania z progiem oraz 1018 x 2044 mm w przypadku rozwiązania z uszczelką opadającą. Ramiaki skrzydła drzwiowego oraz stojaki i nadproże ościeżnicy wykonano z takiego samego trzykomorowego profilu aluminiowego o wymiarach przekroju 46,0 x 80,0 mm, wykonanego z dwóch kształtowników aluminiowych połączonych przekładką termiczną z poliamidu wzmocnionego włóknem szklanym. Drzwi były przeszklone szybą hartowaną o grubości 8 mm, zamocowaną do profili przy użyciu stalowych kątowników, przykrytych aluminiową listwą przyszybową i wyposażone w trzy zawiasy trójskrzydłkowe, trzy bolce antywyważeniowe, listwowy zamek trzypunktowy współpracujący z dźwignią antypaniczną oraz samozamykacz ramieniowy.

Każdy z badanych zestawów drzwiowych zamocowany był, przy użyciu stalowych wkrętów ościeżnicowych, w podatnej konstrukcji mocującej wykonanej z płyt gipsowo-kartonowych zamocowanych do stalowego rusztu. Szczeliny powstałe pomiędzy ościeżnicą badanych drzwi a konstrukcją mocującą wypełnione były szczelną pianką poliuretanową oraz uszczelnione silikonem. Dwie z próbek wyposażono w uszczelkę opadającą, zamontowaną do dolnego profilu skrzydła (próbki oznaczone jako 1 oraz 3), a w przypadku dwóch pozostałych zastosowano wzdłuż dolnej krawędzi aluminiowy próg o wysokości 20 mm (próbki oznaczone jako 2 i 4).

W pierwszej kolejności badaniom poddano próbki nr 1 oraz 3. Następnie drzwi zostały wymontowane, a w ich miejscu znalazły się drzwi o takiej samej konstrukcji, przy czym w celu zasymulowania niedokładności montażu zastosowano inną szerokość szczeliny pomiędzy skrzydłem a ościeżnicą i kra-

the door with a threshold, they amounted to 7.6 mm and 8.2 mm for specimens 2 and 4, respectively. The mean gap values at the given edge are summarised in Table 1. The smoke control tests were conducted in a dedicated chamber at the Fire Testing Laboratory of the Building Research Institute in Pionki. Photography shows the photos of the specimens before the test, from the side of the surface exposed to elevated pressure (from inside the smoke control testing chamber). A test at an elevated temperature (200°C) was performed for each case.

Results

The results of the smoke tightness tests are summarised in Tables 2 and 3 and presented graphically in Figure. Table 2 shows the test specimen air leakage rate at an elevated temperature (200°C) and pressure values of 10 Pa, 25 Pa, and 50 Pa, respectively. Table 3 shows the linear air leakage rate for a circumference limited by the door frame and excluding the threshold length.

Analysing the test results summarised in Tables 1 and 2, one can see no unambiguous correlation between the air leakage values for the door with a drop seal and the threshold. It is apparent that the air leakage values for specimens 1 and 3 are higher than those for specimens 2 and 4. The air leakage value

węźnią progową drzwi. Dotychczas analiza wyników badań skupiała się na wpływie zastosowanego rozwiązania progowego na dymoszczelność. Program przeprowadzonych badań został zaprojektowany pod kątem wychwycenia ewentualnych niedociągnięć montażowych na zachowanie dymoszczelności drzwi. Analiza literatury wskazuje, że tego typu podejście nie było jeszcze stosowane.

W przypadku drzwi z uszczelką opadającą średnia wartość szczelin wynosiła 8,0 i 9,1 mm, odpowiednio w przypadku próbek nr 1 i 3, a drzwi z progiem 7,6 mm oraz 8,2 mm odpowiednio w przypadku próbek nr 2 i 4. Wartości średnich szczelin na danej krawędzi zestawione zostały w tabeli 1. Badania dymoszczelności przeprowadzono z zastosowaniem specjalnej komory, przeznaczonej do tego typu testów, znajdującej się na terenie Laboratorium Badań Ogniowych ITB w Pionkach. Na fotografii przedstawiono próbki przed badaniem, od strony powierzchni poddanej oddziaływaniu podwyższonego ciśnienia (od strony wnętrza komory do badań dymoszczelności). W każdym przypadku przeprowadzono badanie w temperaturze podwyższonej (200°C).

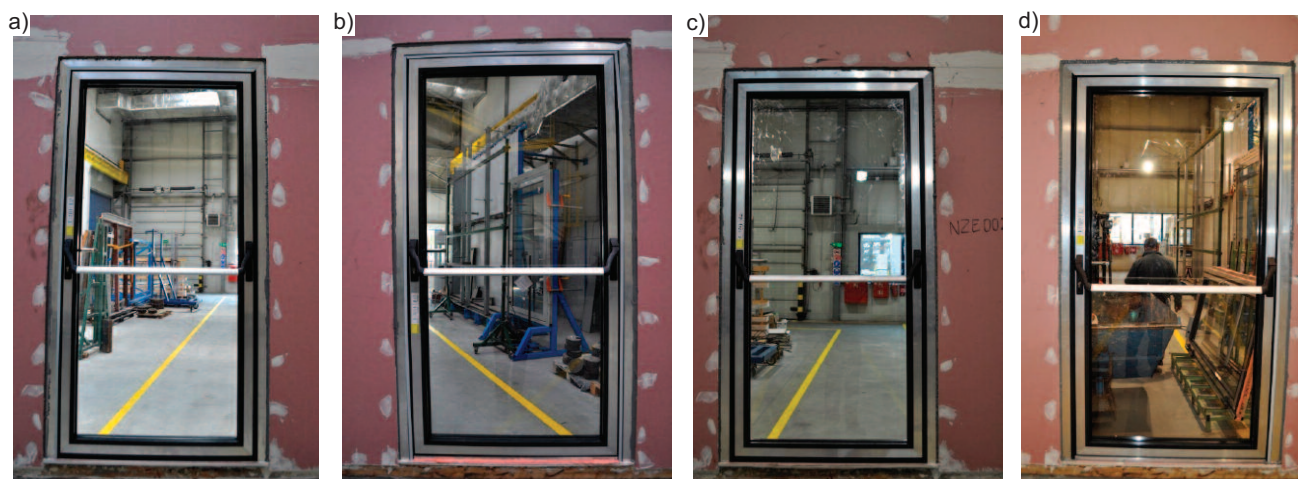
Wyniki

Wyniki badań dymoszczelności przedstawiono w tabelach 2 i 3 oraz w sposób graficzny na rysunku. W tabeli 2 zestawiono wartości strumienia przepływu powietrza przez element próbny w przy-

Table 1. Measured gaps between the door leaf and frame/sill edge

Tabela 1. Pomierzone wartości szczelin pomiędzy skrzydłem a ościeżnicą/krawędzią progową

Specimen No./ Nr próbki	Threshold solution/Rozwiązanie progowe	Mean values of the measured gaps [mm]/Średnia wartość pomierzonych szczelin [mm]				
		edge/krawędź				all edges/wszystkie krawędzie
		lintel/nadprożowa	threshold/progowa	hinge/zawiasowa	lock/zamkowa	
1	drop seal/uszczelka opadająca	7,0	8,4	8,3	8,4	8,0
2	threshold/próg	7,1	6,3	8,7	8,4	7,6
3	drop seal/uszczelka opadająca	7,5	9,6	8,9	10,6	9,1
4	threshold/próg	8,5	5,7	8,9	9,9	8,2



The surface subjected to pressure prior to the smoke control test (samples No. 1 – 4): a) sample No. 1 (drop seal); b) sample No. 2 (threshold); c) sample No. 3 (drop seal); d) sample No. 4 (threshold)

Powierzchnia poddana oddziaływaniu ciśnienia przed badaniem dymoszczelności (próbki nr 1 – 4): a) próbka nr 1 (uszczelka opadająca); b) próbka nr 2 (próg); c) próbka nr 3 (uszczelka opadająca); d) próbka nr 4 (próg)

Photo: archives ITB

Fot.: archiwum ITB

for specimen 3 is, on average, 2.6 times higher than that for specimen 1. The mean air leakage ratio for specimens 2 and 4 is 1.69. Moreover, it can be observed that the air leakage differences between specimens 1 and 3 are greater at the lowest pressure for the door with the drop seal. For the door with the threshold, the air leakage differences are similar across pressure values.

Discussion

Despite differences in air leakage values, one can see that higher values were recorded for the door with a drop seal. The results comply with study [21] authors' observations. They demonstrated a higher efficacy of thresholds with pressure gaskets compared to drop seals. For the first two specimens

padku temperatury podwyższonej (200°C) oraz ciśnienia o wartościach odpowiednio: 10; 25 oraz 50 Pa, a w tabeli 3 wartość liniowego strumienia przepływu powietrza w odniesieniu do obwodu ograniczonego ościeżnicą drzwi przy wykluczeniu długości progów.

Analizując wyniki badań zamieszczone w tabelach 1 i 2, stwierdzono brak jednoznacznej korelacji między wartościami przepływu powietrza przez drzwi z uszczelką opadającą i z progiem, przy czym widoczne jest, że wartości przepływu są większe w przypadku drzwi z uszczelką opadającą. Zwraca też uwagę fakt, że w przypadku próbek 1 i 3 różnice przepływu są większe niż w przypadku próbek 2 i 4 (próbka 3 charakteryzuje się przepływem średnio 2,6-krotnie większym niż próbka 1). W przypadku próbek 2 i 4 średnia krotność wartości przepływu wynosi 1,69. Dodatkowo stwierdzono, że w przypadku drzwi z uszczelką opadającą różnice przepływu

Table 2. Test specimen leakage rate (Q_{spec}) in medium temperature

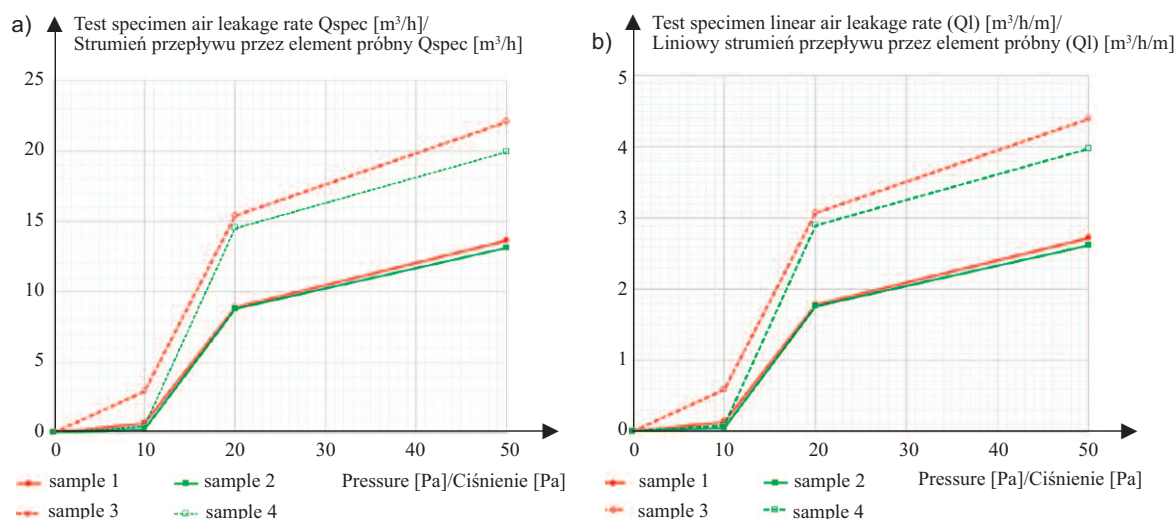
Tabela 2. Strumień przepływu powietrza przez element próbny (Q_{spec}) w temperaturze podwyższonej

Specimen number/ Nr próbki	Threshold solution/Rozwiązanie progowe	Q_{spec} (200°C; 10 Pa) [m³/h]	Q_{spec} (200°C; 25 Pa) [m³/h]	Q_{spec} (200°C; 50 Pa) [m³/h]
1	drop seal/uszczelka opadająca	0,6	8,9	13,6
2	threshold/próg	0,2	8,8	13,1
3	drop seal/uszczelka opadająca	2,9	15,4	22,0
4	threshold/próg	0,4	14,5	19,9

Table 3. Test specimen linear leakage rate (Q_l) in medium temperature

Tabela 3. Liniowy strumień przepływu powietrza (Q_l) przez element próbny w temperaturze podwyższonej

Specimen number/Nr próbki	Threshold solution/Rozwiązanie progowe	Q_l (200°C; 10 Pa) [m³/h/m]	Q_l (200°C; 25 Pa) [m³/h/m]	Q_l (200°C; 50 Pa) [m³/h/m]
1	drop seal/uszczelka opadająca	0,13	1,78	2,72
2	threshold/próg	0,05	1,76	2,62
3	drop seal/uszczelka opadająca	0,59	3,07	4,40
4	threshold/próg	0,09	2,89	3,98



Smoke control in medium temperature test results: a) test specimen leakage rate; b) test specimen linear leakage rate

Wynik badań dymoszczelności w temperaturze podwyższonej: a) strumień przepływu powietrza przez element próbny; b) liniowy strumień przepływu przez element próbny

(1 and 2), the difference in air leakage was insignificant, amounting to no more than 0.5 m³/h at 50 Pa. The difference in air leakage between the tests on specimens 3 and 4 was much higher, reaching a maximum of 2.5 m³/h at 10 Pa. The air leakage values for specimens 1 and 2 and 3 and 4 at 50 Pa were similar.

Referring to the 50 Pa pressure requirement as the standard, and comparing the obtained air leakage results with those measured before gap testing (Table 1), one can conclude that the specimen mounting accuracy affects smoke tightness more than the threshold solution. For specimens 1 and 2, the difference in the mean value of the measured gaps was 0.4 mm, while for specimens 3 and 4 it was twice as high (0.9 mm). In both cases, larger gaps occurred for doors with drop seals. Bigger gaps contributed to an increased hot air leakage through a specimen with the given threshold solution. The difference in the mean gap value between specimens 1 and 3 (doors with drop seals) amounted to 1.1 mm, while for specimens 2 and 4 (doors with thresholds) it was 0.6 mm. Larger gaps contributed to a higher hot air leakage through the door. For the specimen with a drop seal, the air leakage value at an elevated temperature increased by up to 8.4 m³/h, while for the specimen with a threshold, it increased by 6.8 m³/h. In both cases, the greatest differences in air leakage were observed at 50 Pa. According to EN 13501-2 [25], a single-leaf door is classified as a smoke control door at an elevated temperature when the hot-air leakage (air at 200°C) does not exceed 20 m³/h at 50 Pa. Therefore, it should be noted that increasing the gaps in the door with a drop seal, as in the described case, led to the door losing its characteristics.

In the context of the analysed prior literature, the obtained results fill the research gap identified in [20], analysing only the influence of threshold gaps (without considering the interaction of gaps at other edges). Contrary to the referenced research, the methodology presented in this paper simulated actual installation conditions, accounting for simultaneous changes in gaps at all door edges. It is a significant contribution to the domain, as in engineering practice, installation inaccuracies are rarely limited to the threshold.

The influence of pressure on the drop seal's efficacy is particularly interesting. At low pressure values (10 Pa), specimen 3 (drop seal) revealed the air leakage of 2.9 m³/h, while for specimen 4 (threshold) it was only 0.4 m³/h. The difference decreased as the pressure rose, suggesting that a drop seal requires higher pressure to seal the edge effectively. The phenomenon can be explained by the mechanism of seal pressing under pressure, which was not described in prior literature.

The test results have significant practical implications for various professional groups related to fire safety. First and foremost, door makers and persons responsible for door commissioning should be aware that even seemingly minor deviations from the recommended gap dimensions can considerably deteriorate smoke tightness, especially when drop seals are used.

między próbkami 1 i 3 są wyraźnie większe przy najmniejszym ciśnieniu. W przypadku drzwi z progiem różnice w przepływach powietrza są zbliżone, niezależnie od wartości ciśnienia.

Dyskusja

Analizując wyniki badań, stwierdzono, że większe wartości przepływu powietrza zarejestrowane zostały w przypadku drzwi z uszczelką opadającą. Wyniki te są zgodne z obserwacjami autorów pracy [21], którzy również wykazali większą skuteczność progów z uszczelką dociskową niż z uszczelką opadającą. W przypadku dwóch pierwszych próbek (nr 1 i nr 2) różnica pomiędzy przepływem wynosiła maksymalnie 0,5 m³/h w przypadku ciśnienia 50 Pa, a w przypadku próbek nr 3 i nr 4 była zdecydowanie większa i wynosiła maksymalnie 2,5 m³/h przy ciśnieniu 10 Pa. Przy ciśnieniu 50 Pa wartości przepływu były zbliżone w przypadku próbek nr 1 i nr 2 oraz nr 3 i nr 4.

Odnosząc się do wartości ciśnienia 50 Pa, jako wymagania normowego, oraz zestawiając uzyskane wyniki przepływu z wartościami szerokości szczelin pomierzonych przed badaniem (tabela 1), stwierdzono, że większy wpływ na dymoszczelność ma nie tyle sposób rozwiązania progowego, ile dokładność montażu próbki. W przypadku próbek nr 1 i nr 2 różnica między średnią wartością pomierzonych szczelin wynosiła 0,4 mm, natomiast w przypadku próbek nr 3 i nr 4 była ponaddwukrotnie większa (0,9 mm). W obu przypadkach większe szczeliny występowały w drzwiach z uszczelką opadającą. Spowodowały one znaczne zwiększenie przepływu gorącego powietrza przez próbkę z danym rozwiązaniem progowym. Różnica średniej wartości szczelin pomiędzy próbką nr 1 i nr 3 (drzwi z uszczelką opadającą) wynosiła 1,1 mm, natomiast w przypadku próbek nr 2 i nr 4 (drzwi z progiem) wynosiła 0,6 mm. Zwiększenie szczelin spowodowało znaczny wzrost przepływu gorącego powietrza przez drzwi. W przypadku próbki z uszczelką opadającą wartość przepływu powietrza w temperaturze podwyższonej zwiększyła się aż o 8,4 m³/h, a w przypadku próbki z progiem o 6,8 m³/h. W obu próbkach największą różnicę pomiędzy przepływem powietrza zarejestrowano przy ciśnieniu 50 Pa.

Zgodnie z wymaganiami normy EN 13501-2 [25] drzwi jednoskrzydłowe klasyfikuje się jako dymoszczelne w temperaturze podwyższonej w przypadku, gdy wartość przepływu gorącego powietrza (o temperaturze 200°C) nie przekracza 20 m³/h, przy ciśnieniu do 50 Pa. Należy zatem podkreślić, że opisane zwiększenie szczelin w przypadku drzwi z uszczelką opadającą sprawiło, że straciły one swoje właściwości.

W kontekście przeanalizowanej wcześniej literatury, uzyskane wyniki uzupełniają lukę badawczą zidentyfikowaną w pracy [20], gdzie analizowano jedynie wpływ szczelin progowych (bez uwzględnienia współoddziaływania szczelin na innych krawędziach). W przeciwieństwie do przywołanych badań, metoda przedstawiona w artykule symulowała rzeczywiste warunki montażowe, uwzględniając równoczesne zmiany szczelin na wszystkich krawędziach drzwi. Jest to bardzo ważny wynik badań, ponieważ w praktyce inżynierskiej niedokładności montażowe rzadko ograniczają się wyłącznie do progów. Interesujący jest również wpływ ciśnienia na skuteczność uszczelki opadającej. Przy niskim ciśnieniu (10 Pa), próbka

It should be noted that the tests performed have certain constraints. The tests were conducted only on aluminium doors, and their results cannot be automatically extrapolated to structures made of other materials. Moreover, the analysis focused on experimental measurements, whereas numerical modelling could provide additional information on the local air leakage. Such issues could become the focus of future research to help understand the phenomena occurring during smoke penetration through door gaps.

Summary

The study involved testing four specimens of a single-leaf aluminium profile-glazed door with two threshold solution variants and two variants of the gaps between the door leaf and the frame and the mounting structure.

The following conclusions can be drawn based on the results:

- At lower pressure values, the door with a threshold reveals higher smoke tightness (lower hot air leakage). At the pressure limit of 50 Pa, the smoke-tightness of the door with a drop seal and threshold was similar. The phenomenon can be related to the specific operating characteristics of the drop seal. Higher pressure presses the drop seal to the substrate and improves the tightness of the door threshold edge.
- The gaps between the door leaf frame and the door frame and the threshold edge are the primary source of air leakage. For the tested specimens, increasing the mean gap size by ca. 1 mm increased hot air leakage to a level similar to the criterion value for the door with a threshold and exceeded the criterion value for the door with the drop seal.
- Mounting quality/accuracy affects smoke control more than the applied threshold solution type. A seemingly minor enlargement of the gaps between the fixed and movable elements of a door assembly can significantly deteriorate a fire door's smoke-tightness.

*Received: 18.07.2025
Revised: 02.09.2025
Published: 21.11.2025*

nr 3 (uszczelka opadająca) wykazała przepływ 2,9 m³/h, podczas gdy próbka nr 4 (próg) – zaledwie 0,4 m³/h. Różnica ta zmniejszała się wraz ze wzrostem ciśnienia, co sugeruje, że uszczelka opadająca wymaga wyższego ciśnienia, aby skutecznie doszczelnić krawędź. Zjawisko to można wyjaśnić mechanizmem docisku uszczelki pod wpływem ciśnienia, który nie był wcześniej opisany w literaturze.

Uzyskane wyniki badań mają istotne implikacje praktyczne w przypadku różnych grup zawodowych związanych z bezpieczeństwem pożarowym, ale przede wszystkim wykonawcy drzwi oraz osoby odpowiedzialne za ich odbiór powinni być świadomi, że nawet pozornie niewielkie odstępstwa od zalecanych wymiarów szczelin mogą prowadzić do znacznego pogorszenia dymoszczelności, szczególnie w przypadku stosowania uszczelki opadającej.

Należy podkreślić, że przeprowadzone badania mają pewne ograniczenia. Wykonano wyłącznie testy drzwi aluminiowych, a ich wyniki nie mogą być automatycznie ekstrapolowane na konstrukcje z innych materiałów. Ponadto, analiza skupiła się na pomiarach eksperymentalnych, podczas gdy modelowanie numeryczne mogłoby dostarczyć dodatkowych informacji o lokalnych przepływach powietrza. Te zagadnienia mogą stanowić przedmiot przyszłych prac badawczych, które pozwoliłyby na pełniejsze zrozumienie zjawisk zachodzących podczas przenikania dymu przez szczeliny występujące w drzwiach.

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano badania czterech próbek aluminiowych profilowych przeszklonych drzwi jednoskrzydłowych z dwoma wariantami rozwiązania progowego oraz z dwoma wariantami szczelin pomiędzy skrzydłem a ościeżnicą drzwi oraz konstrukcją mocującą. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że:

- przy małych wartościach ciśnienia większą dymoszczelność (mniejszy przepływ gorącego powietrza) wykazują drzwi z progiem niż z uszczelką opadającą. Przy granicznej wartości ciśnienia, tj. 50 Pa, dymoszczelność drzwi z uszczelką opadającą oraz progiem jest natomiast na podobnym poziomie. Zjawisko to może być związane ze specyfiką działania uszczelki opadającej. Zwiększone ciśnienie powoduje jej dociśnięcie do podłoża, doszczelniając krawędź progową drzwi;
- głównym źródłem przepływu powietrza są szczeliny między ramą skrzydła a ościeżnicą i krawędzią progową. W przypadku przebadanych próbek zwiększenie średniej wartości szczelin o ok. 1 mm spowodowało wzrost wartości przepływu gorącego powietrza do poziomu zbliżonego do wartości kryterialnej w przypadku drzwi z progiem oraz przekroczenie wartości kryterialnej w przypadku drzwi z uszczelką opadającą;
- wpływ na dymoszczelność ma w większym stopniu jakość/dokładność montażu niż typ zastosowanego rozwiązania progowego. Z pozoru niewielkie powiększenie szczelin pomiędzy stałymi a ruchomymi elementami zestawu drzwiowego może w znaczny sposób zmniejszyć dymoszczelność drzwi przeciwpożarowych. ►

*Artykuł wpłynął do redakcji: 18.07.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 02.09.2025 r.
Opublikowano: 21.11.2025 r.*

Literature

- [1] Zhang G, Li C, Lu S. Analysis of Fire Evacuation in High-rise Hospitals from a High-rise Hospital Fire Case, in 2019 9th International Conference on Fire Science and Fire Protection Engineering (ICFSFPE). 2019. DOI: 10.1109/ICFSFPE48751.2019.9055807.
- [2] Connolly RJ, Charters DA. The Use of Probabilistic Networks to Evaluate Passive Fire Protection Measures in Hospitals” in Fire Safety Science – Proceedings of the fifth International Symposium. 1997, pp. 583–593.
- [3] Dundar U, Selamet S. Fire load and fire growth characteristics in modern high-rise buildings. *Fire Saf. J.* 2023. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103710.
- [4] Alianto B, Nasruddin N, Nugroho YS. High-rise building fire safety using mechanical ventilation and stairwell pressurization: A review, *J. Build. Eng.* 2022 DOI: 10.1016/j.jobee.2022.104224.
- [5] Yi X et al. Numerical Simulation of Fire Smoke Spread in a Super High-Rise Building for Different Fire Scenarios. *Adv. Civ. Eng.* 2019. DOI: 10.1155/2019/1659325.
- [6] Izydorczyk D, Sędlak B, Sulik P. Fire doors in tunnels emergency exits – smoke control and fire resistance tests, in IFireSS 2017 – 2nd International Fire Safety Symposium Naples, Italy, June 7-9, 2017, 2017, pp. 1–8.
- [7] Baryłka A, Szota M. Material and construction solutions in the construction of civil defence shelters. *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.* 2023. DOI: 10.5604/01.3001.0053.9620.
- [8] Labes WG, Waterman TE, Varley RB. Development of Standard Fire Test Rating Systems for Shelter Components. Final Report. Chicago, IL, 1966.
- [9] Marchant EW. Effect of wind on smoke movement and smoke control systems. *Fire Saf. J.* 1984. DOI: 10.1016/0379-7112 (84) 90008-0.
- [10] Ghodrati M, Shakeriaski F, Nelson DJ, Simeoni A. Existing Improvements in Simulation of Fire – Wind Interaction and Its Effects on Structures. *Fire.* 2021. DOI: 10.3390/fire4020027.
- [11] Cox G. The challenge of fire modelling. *Fire Saf. J.* 1994. DOI: 10.1016/0379-7112 (94) 90021-3.
- [12] Yi X et al. Numerical Simulation of Fire Smoke Spread in a Super High-Rise Building for Different Fire Scenarios. *Adv. Civ. Eng.* 2019. DOI: 10.1155/2019/1659325.
- [13] Huang Y, Wang E, Bie Y. Simulation investigation on the smoke spread process in the large-space building with various height. *Case Stud. Therm. Eng.* 2020. DOI: 10.1016/j.csite.2020.100594.
- [14] He Y, Beck V. Smoke spread experiment in a multi-storey building and computer modelling. *Fire Saf. J.* 1997. DOI: 10.1016/S0379-7112 (96) 00081-1.
- [15] Qin TX, Guo YC, Chan CK, Lin WY. Numerical simulation of the spread of smoke in an atrium under fire scenario. *Build. Environ.* 2009. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.01.014.
- [16] McKeen P, Liao Z. Numerical analysis on the hazards of open stairwell doors in high-rise residential buildings. *J. Build. Eng.* 2022. DOI: 10.1016/j.jobee.2022.104561.
- [17] Li LJ, Ji J, Fan CG, Sun JH, Yuan XY, Shi WX. Experimental investigation on the characteristics of buoyant plume movement in a stairwell with multiple openings. *Energy Build.* 2014. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.09.028.
- [18] He J, Huang X, Ning X, Zhou T, Wang J, Yuen R. Stairwell smoke transport in a full-scale high-rise building: Influence of opening location. *Fire Saf. J.* 2020. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103151.
- [19] Ji J, Wan H, Li Y, Li K, Sun J. Influence of relative location of two openings on fire and smoke behaviors in stairwell with a compartment. *Int. J. Therm. Sci.* 2015. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.10.008.
- [20] Cheung SCP, Lo SM, Yeoh GH, Yuen RKK. The influence of gaps of fire-resisting doors on the smoke spread in a building fire. *Fire Saf. J.* 2006. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.05.007.
- [21] Sędlak B, Frączek A, Sulik P. Wpływ zastosowanego rozwiązania progowego na dymoszczelność drzwi przeciwpożarowych. *Materiały Budowlane.* 2016. DOI: 10.15199/33.2016.07.07.
- [22] Kinowski J, Sędlak B, Sulik P. Odporność ogniowa i dymoszczelność drzwi zgodnie z PN-EN 16034. *Materiały Budowlane.* 2015. DOI: 10.15199/33.2015.11.20.
- [23] Sędlak B. Przeszkłone drzwi dymoszczelne – badania oraz klasyfikacja w zakresie dymoszczelności. *Świat Szkła.* 2013; vol. 18, no. 4, pp. 35–38.
- [24] Hung HY, Lin CY, Chuang YJ, Luan CP. Application Development of Smoke Leakage Test Apparatus for Door Sets in the Field. *Fire.* 2022. DOI: 10.3390/fire5010012.
- [25] EN 13501-2:2023 Fire classification of construction products and building elements. Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services.