

dr inż. Bartłomiej Sędlak^{1*)}

ORCID: 0000-0002-4715-6438

mgr inż. Marzena Jakimowicz¹⁾

ORCID: 0000-0002-8173-3585

mgr inż. Artur Frączek¹⁾

ORCID: 0000-0003-4826-2010

dr inż. Krzysztof Kuczyński¹⁾

ORCID: 0000-0001-9243-2529

Smoke control characteristic of aluminum-framed glazed single-leaf fire-resisting doors subjected to repeated opening and closing cycles

Dymoszczelność aluminiowych przeszklonych przeciwpożarowych drzwi jednoskrzydłowych narażonych na cykle wielokrotnego otwierania i zamykania

DOI: 10.15199/33.2026.04.02

Abstract. This paper presents the results of experimental investigations on the influence of repeated opening and closing cycles (mechanical durability in accordance with EN 1191) on the smoke tightness of aluminum profiled glazed fire doors. Smoke leakage tests were carried out in accordance with EN 1634-3 for doors in the new condition and after 100,000, 150,000, 200,000, 250,000 and 300,000 operating cycles. Measurements were performed at ambient temperature (20°C) and at elevated temperature (200°C) under various pressure differentials. The obtained results showed a significant increase in total air leakage with an increasing number of operating cycles, indicating a gradual deterioration of smoke tightness during service. The paper discusses possible mechanisms responsible for the degradation of sealing performance and highlights the need to consider service-related effects in procedures for the assessment and maintenance of the performance of fire door assemblies.

Keywords: smoke control; fire doors; opening and closing cycles; mechanical durability; service life; fire safety; sealing systems.

Fire is a phenomenon of uncontrolled burning that causes material losses and poses a direct hazard to human life and health. Large amounts of smoke containing toxic combustion products are among the most dangerous effects of fire. Analyses of fire events unambiguously show that smoke, rather than the impact of flames, is the most frequent cause of deadly fires. In a smoky environment, building occupants quickly lose spatial orientation, which makes evacuation much more difficult. Reduced oxygen content and presence of toxic gases may lead to loss of consciousness and – consequently – death [1 ÷ 3]. To that end, providing conditions that ensure evacuation routes remain smoke-free or are characterised by the lowest possible smoke concentration within the time required to leave the building is a key fire safety issue.

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących wpływu wielokrotnych cykli otwierania i zamykania (trwałość mechaniczna wg EN 1191) na dymoszczelność aluminiowych profilowych przeszklonych drzwi przeciwpożarowych. Badania przeprowadzono zgodnie z normą EN 1634-3 dotyczącą drzwi w stanie nowym oraz po 100, 150, 200, 250 i 300 tys. cykli eksploatacyjnych. Pomiary wykonano w temperaturze otoczenia (20°C) oraz temperaturze podwyższonej (200°C) i przy różnym poziomie różnicy ciśnienia. Uzyskane wyniki wykazały istotne zwiększenie całkowitego przepływu powietrza wraz ze wzrostem liczby cykli użytkowych, co wskazuje na stopniowe pogarszanie się dymoszczelności drzwi podczas eksploatacji. Ponadto omówiono możliwe mechanizmy degradacji uszczelnienia oraz wskazano na potrzebę uwzględniania oddziaływań eksploatacyjnych w procedurach oceny i utrzymania właściwości drzwi przeciwpożarowych.

Słowa kluczowe: dymoszczelność; drzwi przeciwpożarowe; cykle otwierania i zamykania; trwałość mechaniczna; eksploatacja; bezpieczeństwo pożarowe; uszczelnienia.

Pożar jest zjawiskiem polegającym na niekontrolowanym procesie spalania, który prowadzi do strat materialnych oraz stanowi bezpośrednie zagrożenie życia i zdrowia ludzi. Jednym z jego najbardziej niebezpiecznych skutków jest wydzielanie się dużej ilości dymu, zawierającego toksyczne produkty spalania. Analizy zdarzeń pożarowych wskazują jednoznacznie, że to właśnie dym – a nie bezpośrednio oddziaływanie płomieni – jest najczęstszą przyczyną ofiar śmiertelnych pożarów. W środowisku zadymionym użytkownicy budynków szybko tracą orientację przestrzenną, co znacznie utrudnia ewakuację, natomiast zmniejszona zawartość tlenu oraz obecność toksycznych gazów mogą prowadzić do utraty przytomności, a w konsekwencji do śmierci [1 ÷ 3]. Z tego względu jednym z kluczowych zagadnień bezpieczeństwa pożarowego jest zapewnienie takich warunków, aby drogi ewakuacyjne, w czasie niezbędnym do opuszczenia obiektu, pozostawały wolne od dymu lub charakteryzowały się możliwie małą jego koncentracją.

¹⁾ Instytut Techniki Budowlanej

^{*)} Correspondence address: b.sedlak@itb.pl

Fire doors play a vital role in limiting the spread of smoke in buildings. In addition to the required fire resistance, they should provide adequate smoke control. They are broadly used in public buildings such as hospitals, schools, cinemas, and shopping malls [4, 5], high-rise and super-high-rise buildings [6, 7, 8], special-purpose structures, such as tunnels [9, 10] and public buildings where protective structures are provided [11, 12]. In the event of a fire, the primary task of fire doors is to limit smoke migration between fire zones, ensuring safe evacuation conditions for users and facilitating rescue operations.

The fire door performance requirements, including fire resistance and smoke control, are set out in a harmonised product standard EN 16034 [13]. Door classification is carried out in accordance with EN 13501-2 [14], in which individual characteristics, such as fire resistance, smoke control, and self-closing capability, are assessed independently based on laboratory test results [15]. The procedures apply to new products and do not directly account for the influence of long-term operation on maintaining the declared performance.

Reaching the required smoke control rating of fire doors depends primarily on effective sealing of the gaps between the door leaf and frame, and – for double-leaf doors – between the adjacent door leaves and the threshold zone. The lock, hinge and lintel edges are typically sealed using compression gaskets mounted on the door leaf or frame. The solutions for the threshold edge involve using various structural solutions, e.g. drop-down seals or fixed thresholds featuring compression gaskets. Installation accuracy plays a significant role in both cases. Even seemingly minor changes in the gap dimensions may lead to a significant increase in the smoke leakage through the closed door [16].

Smoke spread in buildings has been investigated over the recent decades in various experimental and numerical studies, including but not limited to impact analysis of ventilation conditions, and the influence of wind and spatial geometry on smoke migration [1 ÷ 3, 8, 17 ÷ 19]. Many papers applied to air and smoke penetration through various openings in building partitions, including staircases and lift shafts [20 ÷ 23]. Most studies assumed that the doors or other closures of the partition openings remained open. The main focus was on the uncontrolled spread of smoke through open passages.

Only a few studies directly concerned smoke leakage through a closed fire door. Experimental studies demonstrating a significant influence of the threshold solution type and installation accuracy on the smoke control of fire doors [24, 25] are of particular importance. Except for the papers mentioned above, publications on smoke control of doors primarily discuss testing procedures and classification methods. A detailed description of both issues is included in [10, 15]. Special attention should be paid to [26], which presents the smoke control testing methodology for doors installed in existing building structures. The available publications lack studies that would systematically analyse the influence of long-lasting operation of fire doors (meant as the impact of multiple

Istotną rolę w ograniczaniu rozprzestrzeniania się dymu w budynkach odgrywają drzwi przeciwpożarowe, które – obok wymaganej odporności ogniowej – powinny zapewniać odpowiedni poziom dymoszczelności. Elementy te znajdują powszechne zastosowanie w budynkach użyteczności publicznej, takich jak szpitale, szkoły, kina czy galerie handlowe [4, 5], w budynkach wysokich i wysokościowych [6, 7, 8], a także w obiektach o specjalnym przeznaczeniu, m.in. w tunelach [9, 10] oraz w budynkach użyteczności publicznej, w których zapewnia się budowlę ochronne [11, 12]. Podstawowym zadaniem drzwi przeciwpożarowych w warunkach pożaru jest ograniczenie migracji dymu pomiędzy strefami pożarowymi, zapewnienie bezpiecznych warunków ewakuacji użytkowników oraz umożliwienie prowadzenia działań ratowniczych.

Wymagania dotyczące właściwości użytkowych drzwi przeciwpożarowych, w tym odporności ogniowej i dymoszczelności, określone zostały w zharmonizowanej normie wyrobu EN 16034 [13]. Klasyfikacja drzwi prowadzona jest zgodnie z normą EN 13501-2 [14], przy czym poszczególne cechy – odporność ogniowa, dymoszczelność oraz zdolność do samoczynnego zamykania – oceniane są niezależnie, na podstawie wyników odpowiednich badań laboratoryjnych [15]. Procedury te odnoszą się jednak do wyrobów w stanie „nowym” i nie uwzględniają wprost wpływu długotrwałej eksploatacji na zachowanie deklarowanych właściwości użytkowych.

Osiągnięcie wymaganej klasy dymoszczelności drzwi przeciwpożarowych uzależnione jest przede wszystkim od skutecznego doszczelnienia szczelin pomiędzy skrzydłem drzwiowym a ościeżnicą oraz, w przypadku drzwi dwuskrzydłowych, pomiędzy sąsiadującymi skrzydłami, a także w strefie progowej. Krawędzie zamkowa, zawiasowa i nadprożowa uszczelniane są zazwyczaj przy użyciu uszczelki dociskowej, montowanych w skrzydle lub ościeżnicy. Szczelina progowa zabezpieczana jest natomiast przy zastosowaniu różnych rozwiązań konstrukcyjnych, takich jak uszczelki opadające lub stałe progi wyposażone w uszczelki dociskowe. W obu przypadkach kluczowe znaczenie ma również dokładność montażu – nawet niewielka zmiana szerokości szczelin może prowadzić do zwiększenia przepływu dymu przez zamknięcie otworu [16].

Zagadnienie rozprzestrzeniania się dymu w budynkach było w ostatnich dekadach przedmiotem wielu badań eksperymentalnych i numerycznych, obejmujących m.in. analizę wpływu warunków wentylacyjnych, oddziaływania wiatru oraz geometrii przestrzeni na migrację dymu [1 ÷ 3, 8, 17 ÷ 19]. Wiele prac dotyczyło również przepływu powietrza i dymu przez różnego rodzaju otwory w przegrodach budowlanych, w tym klatki schodowe i szyby komunikacyjne [20 ÷ 23]. Badania te w przeważającej mierze zakładały jednak, że drzwi lub inne zamknięcia otworów pozostają w pozycji otwartej, koncentrując się na scenariuszach związanych z niekontrolowanym rozprzestrzenianiem się dymu przez otwarte przejścia.

Publikacje odnoszące się bezpośrednio do przepływu dymu przez zamknięte drzwi przeciwpożarowe są nieliczne. Szczególnie istotne znaczenie mają badania eksperymentalne, w których wykazano istotny wpływ rodzaju rozwiązania progowego oraz dokładności montażu na dymoszczelność drzwi przeciwpożarowych [24, 25]. Poza pracami przywoła-

opening and closing cycles on mechanical resistance tested in accordance with EN 1191 [27]) on their smoke control performance. The recently published papers [28, 29] analyse the influence of operating cycles on the fire resistance of aluminium-profile fire doors. Multiple opening and closing cycles were not shown to reduce the door's fire resistance rating significantly. Nevertheless, air leakage increased considerably with the number of operating cycles. The paper's authors interpreted it as a potential premise for the deterioration of the door set smoke control performance. The results suggest that although the primary function of the fire partition can be maintained, the essential safety performance can gradually deteriorate during service. The conclusions in the cited papers provided a basis for experimental verification of the effects of multiple opening and closing cycles on fire door smoke control. The verification results are described in this paper. Similar to the publications above, single-leaf aluminium-profiled glazed doors, which are common in heavy-traffic areas, were used for smoke control tests.

A literature review revealed a significant knowledge gap. Although many papers focus on modelling smoke spread through an open door or testing the smoke control of a new door, only a few studies have analysed the influence of operation on fire resistance. Moreover, the available publications lack systematic experimental studies that quantitatively link the number of operating cycles to smoke-control deterioration. It is essential to understand whether and how multiple opening and closing cycles, simulating real-world use in heavy-traffic areas, affect the door's capacity to fulfil one of its crucial functions in the event of a fire, i.e., limiting smoke migration. This paper attempts to fill the knowledge gap by providing empirical data on changes in smoke leakage as a function of an increasing number of operating cycles.

This study aims to experimentally assess the influence of long-lasting operation, meant as multiple opening and closing cycles, on the smoke control of aluminium-profile fire doors. The focus is on quantitatively determining changes in total air leakage through a door assembly after a set number of operating cycles and on identifying potential mechanisms of sealing degradation. The authors hypothesised that multiple operating cycles lead to a significant deterioration in the smoke control of fire doors, despite their maintaining self-closing function and structural integrity. The deterioration scale is assumed to depend on the test temperature, which may result from the change in the performance of sealing materials at elevated temperatures.

The paper's novelty lies in linking the number of operating cycles to smoke control test results. This enables assessment of smoke-control reliability in the context of the real operation of fire doors.

Materials and methods

Smoke control tests on single-leaf aluminium-profile glazed doors with a threshold along the bottom edge of the door assembly were conducted as part of this study. The first

nymi publikacje związane z dymoszczelnością drzwi w głównej mierze zajmują się omówieniem procedur badawczych oraz metod klasyfikacji. Szczegółowy opis obu zagadnień odnaleźć można w publikacjach [10, 15]. Na szczególną uwagę zasługuje praca [26], w której przedstawiono metodę badania dymoszczelności drzwi zamontowanych w istniejących obiektach budowlanych. Jednocześnie w dostępnych publikacjach nie ma opracowań, które w sposób systematyczny analizowałyby wpływ długotrwałej eksploatacji drzwi przeciwpożarowych, rozumianej jako wielokrotne cykle otwierania i zamykania w rozumieniu trwałości mechanicznej sprawdzanej wg metody opisanej w EN 1191 [27], bezpośrednio na ich dymoszczelność. W ostatnich latach opublikowano jednak prace [28, 29], w których analizowano wpływ cykli eksploatacyjnych na odporność ogniową aluminium, profilowych drzwi przeciwpożarowych. Wykazano w nich, że wielokrotne otwieranie i zamykanie nie powoduje istotnego obniżenia klasy odporności ogniowej drzwi, ale jednocześnie zaobserwowano wyraźne zwiększenie przepuszczalności powietrza wraz ze wzrostem liczby cykli użytkowych, co autorzy interpretowali jako potencjalną przesłankę do pogorszenia dymoszczelności zestawu drzwiowego. Wyniki te wskazują, że choć podstawowa funkcja oddzielenia przeciwpożarowego zostanie zachowana, to właściwości użytkowe, istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa ewakuacji, mogą ulegać stopniowej degradacji podczas eksploatacji. Wnioski zawarte w przywołanych artykułach stanowiły podstawę do przeprowadzenia eksperymentalnej weryfikacji wpływu wielokrotnego otwierania i zamykania na dymoszczelność drzwi przeciwpożarowych, której wyniki opisano w artykule. Podobnie jak w przypadku przywołanych artykułów, do badania dymoszczelności wytypowane zostały jednoskrzydłowe aluminium drzwi profilowe, które dosyć często stosowane są w miejscach narażonych na duże natężenie ruchu.

Przeprowadzony przegląd literatury ujawnia istotną lukę poznawczą. Podczas gdy liczne prace koncentrują się na modelowaniu rozprzestrzeniania się dymu przez otwarte drzwi lub na badaniu dymoszczelności drzwi w stanie nowym, a nieliczne analizują wpływ eksploatacji na odporność ogniową, to w dostępnych publikacjach brakuje systematycznych badań eksperymentalnych, które w ilościowy sposób łączyłyby liczbę cykli użytkowania z pogarszaniem ich dymoszczelności. Szczególnie istotne jest zrozumienie, czy i w jakim stopniu wielokrotne otwieranie i zamykanie, symulujące rzeczywiste użytkowanie w miejscach o dużym natężeniu ruchu, wpływa na zdolność drzwi do spełniania jednej z ich kluczowych funkcji w warunkach pożaru, jaką jest ograniczenie migracji dymu. Przeprowadzone badania koncentrują się na wypełnieniu tej luki przez dostarczenie empirycznych danych na temat zmian przepuszczalności dymu w funkcji narastającej liczby cykli eksploatacyjnych.

Badania ukierunkowane zostały na ilościowe określenie zmian całkowitego przepływu powietrza przez zestaw drzwiowy po zadanych liczbach cykli użytkowych oraz na identyfikację potencjalnych mechanizmów degradacji uszczelnienia. W pracy postawiono hipotezę, że wielokrotne cykle eksploatacyjne prowadzą do istotnego pogorszenia

test was carried out on the reference specimen, subjected only to 30 opening and closing cycles using a closer, in accordance with the requirements of the testing standard [30]. Other smoke control tests were performed after 100,000, 150,000, 200,000, 250,000, and 300,000 opening and closing cycles.

The test specimen was made as a single-leaf, fully glazed (with no transverse division bar), aluminium-profile door. The outer dimensions of the door frame were 1,120 x 2,100 mm (width x height), and the door leaf dimensions were 1,018 x 2,036 mm. The door leaf muntins and the door frame jambs and header were made of identical three-chamber aluminium profiles. The profile, with cross-section dimensions of 46.0 x 80.0 mm, was made of two aluminium shapes connected with a thermal spacer made of glass fibre-reinforced polyamide. The door was glazed with an 8-mm-thick tempered glass pane. The glazing was fixed to the profiles using steel angles covered with an aluminium glazing head. The door featured three triple-winged hinges, three anti-theft bolts, a three-point lock interacting with an anti-panic lever and an overhead door closer. The door assembly was secured with steel frame screws in a flexible mounting structure composed of plasterboard attached to a steel grid. The gaps between the tested door frame and the fixing structure were tightly filled with polyurethane foam and sealed with silicone. A 20 mm high aluminium threshold was installed along the door assembly's bottom edge.

The door not exposed to functional loads was tested first. Then the door was connected to an apparatus that simulated opening and closing cycles. A mobile station controlling the door leaf movement was connected to the specimen installed in the fixing structure. The mobile station featured a pneumatic actuator controlling the door leaf's rotary motion and an automatic cycle meter (open-closed cycle, the product's main operating mode). The multiple opening and closing cycles test consisted of the following steps: actuator pressing the door handle, releasing the door pawl with a set force, actuator pushing the door leaf open to 90°, and the door leaf spontaneously returning to the initial position, including slamming. Successive smoke control tests were performed after each set cycle number (100k, 150k, 200k, 250k, and 300k). The tests were conducted in a dedicated testing chamber at the Fire Testing Laboratory of the Building Research Institute in Pionki. Photo shows a specimen photo taken from the side of the surface exposed to elevated pressure (from inside the smoke control testing chamber).

It should be emphasised that all smoke control tests were conducted on the same door sample. This way, the influence of successive operating cycles could be directly compared, but at the same time, the possibility of a statistical assessment of the scatter of results was limited. The applied methodology corresponds to the approach used in durability tests but the results shall be interpreted as representative of the analysed structure and assumed installation conditions. It would be valid to extend the future test programme to include more specimens and various threshold solutions and sealing systems.

dymoszczelności drzwi przeciwpożarowych, mimo zachowania ich zdolności do samoczynnego zamykania oraz integralności konstrukcyjnej. Zakłada się również, że skala tego pogorszenia zależy od temperatury badania, co może wynikać ze zmiany właściwości materiałów uszczelniających w warunkach podwyższonej temperatury.

Nowatorstwo badań polega na powiązaniu liczby cykli użytkowych z wynikami badań dymoszczelności, co pozwala na ocenę trwałości tej właściwości w kontekście rzeczywistej eksploatacji drzwi przeciwpożarowych.

Materiały i metody badań

W ramach pracy prezentowanej w artykule przeprowadzono badania dymoszczelności jednoskrzydłowych aluminiowych profilowych drzwi przeszklonych z zastosowanym profilem wzdłuż dolnej krawędzi zestawu drzwiowego. Pierwsze badanie dotyczyło próbki odniesienia, która poddana została wyłącznie trzydziestu cyklom ręcznego otwarcia i zamknięcia przy użyciu zamykacza, wymaganym przez normę badawczą [30]. Kolejne badania dymoszczelności wykonano po 100, 150, 200, 250 i 300 tys. cyklów otwierania i zamykania.

Elementem próbnym do badań były w pełni przeszklone (bez zastosowanej poprzeczki podziałowej) aluminiowe, profilowe drzwi jednoskrzydłowe. Wymiary zewnętrzne ościeżnicy drzwi wynosiły 1120 x 2100 mm (szerokość x wysokość), a wymiary skrzydła drzwiowego 1018 x 2036 mm. Ramiaki skrzydła drzwiowego oraz stojaki i nadproże ościeżnicy wykonane były 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 grubości 8 mm. Przeszklenie zamocowano do profili przy użyciu stalowych kątowników, przykrytych aluminiową listwą przyszybową. Drzwi wyposażone były w trzy zawiasy trójskrzydłkowe, trzy bolce antyważeniowe, listwowy zamek trzypunktowy współpracujący z dźwignią antypaniczną oraz samozamykacz ramieniowy.

Zestaw drzwiowy został zamocowany 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 szczelnie pianką poliuretanową oraz uszczelnione silikonem. Wzdłuż dolnej krawędzi zestawu drzwiowego zastosowano aluminiowy próg o wysokości 20 mm.

W pierwszej kolejności przeprowadzono badanie dymoszczelności drzwi niepoddanych obciążeniom funkcjonalnym. Następnie drzwi zostały połączone do aparatury symulującej cykliczne otwieranie i zamykanie. Do próbki zamontowanej w konstrukcji mocującej podłączono mobilne stanowisko dojazdowe sterujące ruchem skrzydła drzwi. Stanowisko to wyposażone było w pneumatyczny siłownik sterujący ruchem obrotowym skrzydła drzwiowego oraz w automatyczny licznik cykli (cykl otwarte-zamknięte jako główny tryb pracy wyrobu). Cykl badawczy odporności na wielokrotne otwieranie i zamykanie składał się z naciśnięcia przez siłownik klamki

Given the exploratory nature of the tests and the fact that all smoke control tests were performed on a single specimen (which is typical for durability tests at this scale), no replicate measurements were performed for the same state of wear. That is why typical statistical measures, such as standard deviation or confidence intervals, were determined. The results should be interpreted qualitatively and quantitatively as change trends for the analysed structure. The conclusions drawn provide a basis for planning more extensive tests with a representative statistical sample.



Pressurized surface prior to the smoke control test

Photo. ITB archives

Powierzchnia poddana oddziaływaniu ciśnienia przed badaniem dymoszczelności

Fot. archiwum ITB

Results and their analysis

This chapter presents only the results of experimental measurements, without their interpretation presented in the following chapter. The results of the smoke control tests are summarised in Tables 1 and 2 and in Figures 1 and 2. The tables show the total leakage values (through the test specimen and mounting structure) at ambient temperature (20°C; Table 1) and at elevated temperature (200°C; Table 2), and at pressures of 10 Pa, 25 Pa, and 50 Pa.

An analysis of the results summarised in Tables 1 and 2 indicates an apparent influence of the opening and closing cycles on the smoke control of the tested specimen (aluminium door with a fixed threshold). The most marked effect was observed at an ambient temperature. The comparison of measurements before the cycles and after 300,000 cycles revealed an increase in the total air leakage to a value about 100% higher for both pressure values, i.e. 10 Pa and 25 Pa (due to equipment limitations the leakage over 65 m³/h could not be measured – measurement at 50 Pa pressure was impossible), suggesting a significant sealing deterioration due to operation. At elevated temperatures, the increases were lower but still significant (ca. 40% at 25 and 50 Pa after 300,000 cycles).

skrzydła drzwiowego, zwolnienia zapadki skrzydła ze ściśle określoną siłą, wypchnięcia przez siłownik skrzydła drzwi do kąta otwarcia 90° i samoczynnego jego powrotu do pozycji wyjściowej wraz z zatrzaśnięciem. Po każdej liczbie cykli (100k, 150k, 200k, 250k, 300k) przeprowadzono kolejne badanie dymoszczelności w specjalnej komorze przeznaczonej do tego typu testów, znajdującej się na terenie Laboratorium Badań Ogniwych ITB w Pionkach. Na fotografii przedstawiono próbki wykonane od strony powierzchni poddanej oddziaływaniu podwyższonego ciśnienia (od strony wnętrza komory do badania dymoszczelności).

Należy podkreślić, że wszystkie badania dymoszczelności wykonano na tej samej próbce drzwi. Pozwoliło to na bezpośrednie porównanie wpływu kolejnych cykli eksploatacyjnych, ale jednocześnie ograniczyło możliwość statystycznej oceny rozrzutu wyników. Przyjęta metoda odpowiada podejściu stosowanemu w badaniach trwałości, ale uzyskane wyniki należy interpretować jako reprezentatywne w przypadku analizowanej konstrukcji i przyjętych warunków montażowych. W dalszych badaniach zasadne byłoby rozszerzenie programu o większą liczbę próbek oraz różne rozwiązania progowe i systemy uszczelnień.

Ze względu na eksploracyjny charakter badań oraz fakt, że wszystkie pomiary dymoszczelności przeprowadzono na pojedynczej próbce (co jest typowe w przypadku badań trwałości w tej skali), nie przeprowadzono wielokrotnych powtórzeń pomiarów przy tym samym stanie zużycia. W związku z tym nie wyznaczano typowych miar statystycznych, takich jak odchylenie standardowe czy przedziały ufności. Uzyskane wyniki należy interpretować jakościowo i ilościowo w kategoriach trendów zmian analizowanej konstrukcji, a wnioski z nich płynące stanowią podstawę do planowania szerszych badań z reprezentatywną próbą statystyczną.

Wyniki i ich analiza

Wyniki badania dymoszczelności zestawiono w tabelach 1 i 2 oraz na rysunkach 1 i 2. Przedstawiono wartości całkowitego przepływu (suma przepływu przez element próbny oraz konstrukcję mocującą) w przypadku temperatury otoczenia (20°C, tabela 1), temperatury podwyższonej (200°C, tabela 2) oraz ciśnienia o wartościach odpowiednio: 10, 25 oraz 50 Pa.

Analiza wyników przedstawionych w tabelach 1 i 2 wskazuje na wyraźny wpływ cykli otwierania i zamykania na dymoszczelność badanej próbki drzwi aluminiowych z progami stałym. Najbardziej wyraźny efekt zaobserwowano przy temperaturze otoczenia. Porównanie pomiarów przed cyklami i po 300 tys. cykli wykazało wzrost całkowitego przepływu powietrza do wartości o ok. 100% większej zarówno przy ciśnieniu 10 Pa, jak i 25 Pa (ze względu na ograniczenia sprzętowe – nie było możliwości zmierzenia przepływu powyżej 65 m³/h – pomiar przy ciśnieniu 50 Pa nie był możliwy), co wskazuje na istotne pogorszenie uszczelnienia w wyniku eksploatacji. Przy temperaturze podwyższonej wzrost przepuszczalności był mniejszy, choć wciąż istotny (ok. 40% przy 25 Pa i 50 Pa w przypadku 300 tys. cykli).

Table 1. Smoke control test results aluminum profiled doors with threshold (ambient temperature → 20°C)

Tabela 1. Wyniki badania dymoszczelności aluminiowych drzwi profilowych z zastosowanym progiem stałym (temperatura otoczenia → 20°)

Test number/Nr badania	Number of cycles/Liczba cykli	Qt (20°C; 10 Pa)	Qt (20°C; 25 Pa)	Qt (20°C; 50 Pa)
1	0	13,5	28,0	46,2
2	100k	24,3	47,3	n.d. ¹⁾
3	150k	18,9	37,0	58,5
4	200k	26,7	51,7	n.d. ²⁾
5	250k	21,3	40,4	63,9
6	300k	26,9	56,7	n.d. ³⁾

¹⁾ due to equipment limitations, the required pressure could not be reached; the maximum possible leakage (65 m³/h) was reached at 38,3 Pa/ze względu na ograniczenia sprzętowe nie było możliwe osiągnięcie wymaganego ciśnienia, maksymalny możliwy przepływ 65 m³/h został osiągnięty przy ciśnieniu 38,3 Pa;

²⁾ due to equipment limitations, the required pressure could not be reached; the maximum possible leakage (65 m³/h) was reached at 35,3 Pa/ze względu na ograniczenia sprzętowe nie było możliwe osiągnięcie wymaganego ciśnienia, maksymalny możliwy przepływ 65 m³/h został osiągnięty przy ciśnieniu 35,3 Pa;

³⁾ due to equipment limitations, the required pressure could not be reached; the maximum possible leakage (65 m³/h) was reached at 29,8 Pa/ze względu na ograniczenia sprzętowe nie było możliwe osiągnięcie wymaganego ciśnienia, maksymalny możliwy przepływ 65 m³/h został osiągnięty przy ciśnieniu 29,8 Pa

The observed increase in air leakage is consistent with the results of studies [29, 30] on the influence of opening and closing cycles on the fire resistance of similar doors. The authors interpreted the observed increase in air leakage as a potential indicator of deterioration in smoke control performance. This investigation has empirically confirmed the thesis. Moreover, the results align with the conclusions of papers [24] and [25], which demonstrate that even minor changes to the gap geometry (in this case, due to installation accuracy) considerably affect the air leakage rate. This suggests that accumulated mechanical wear (abrasive wear of seals, microdeformations) can lead to effective widening of gaps.

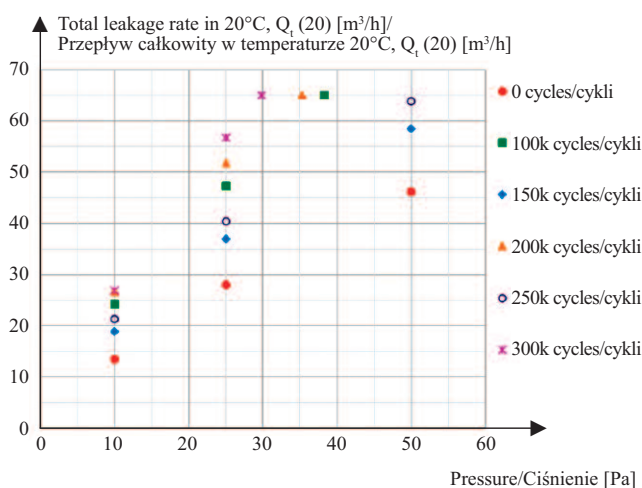


Fig. 1. Results of total leakage rate (through the test specimen and supporting construction) at ambient temperature (20°C)

Fig. authors' own study

Rys. 1. Wyniki całkowitego przepływu powietrza (przez element próbny oraz konstrukcję mocującą) w temperaturze otoczenia (20°C)

Rys. opracowanie własne autorów

Table 2. Smoke control test results aluminum profiled doors with threshold (mean temperature → 200°C)

Tabela 2. Wyniki badania dymoszczelności aluminiowych drzwi profilowych z zastosowanym progiem stałym (temperatura podwyższona → 200°)

Test number/Nr badania	Number of cycles/Liczba cykli	Qt (200°C; 10 Pa)	Qt (200°C; 25 Pa)	Qt (200°C; 50 Pa)
1	0	3,1	24,0	38,8
2	100k	4,1	28,5	47,8
3	150k	2,8	23,7	41,0
4	200k	4,3	28,3	48,2
5	250k	2,6	25,2	44,2
6	300k	2,0	34,3	56,5

Zaobserwowany wzrost przepuszczalności powietrza jest zgodny z wynikami prac [29, 30], w ramach których badano wpływ cykli otwierania i zamykania na odporność ogniową analogicznych drzwi. W badaniach tych odnotowano również zwiększenie przepuszczalności powietrza, które autorzy interpretowali jako potencjalny wskaźnik pogorszenia dymoszczelności. Przeprowadzone przez nas badania stanowią empiryczne potwierdzenie tej tezy. Ponadto, uzyskane wyniki korespondują z wnioskami zawartymi w pracach [24, 25], w których wykazano, że nawet niewielkie zmiany geometrii szczelin (w tym przypadku wynikające z dokładności montażu) mają istotny wpływ na strumień przeciekającego powietrza. Sugeruje to, że skumulowane zużycie mechaniczne (ścieranie uszczelek, mikrodeformacje) może prowadzić do efektywnego poszerzenia szczelin. W odróżnieniu od badań symulacyjnych [20 ÷ 23], które koncentrują się na przepływie powietrza przez otwarte drzwi, nasza praca dostarcza unikatowych danych w przypadku niewralgicznego scenariusza, czyli zamkniętych drzwi, których uszczelnienie uległo degradacji.

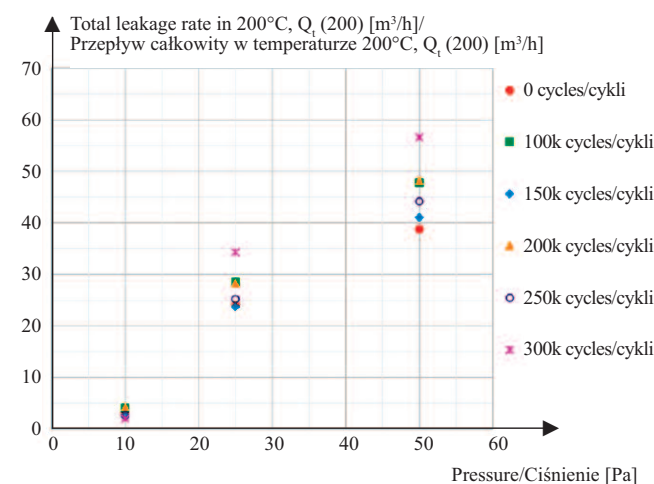


Fig. 2. Results of total leakage rate (through the test specimen and supporting construction) at mean temperature (200°C)

Fig. authors' own study

Rys. 2. Wyniki całkowitego przepływu powietrza (przez element próbny oraz konstrukcję mocującą) w temperaturze podwyższonej (200°C)

Rys. opracowanie własne autorów

Contrary to simulation studies [20 ÷ 23] which focus on the leakage through open doors, this study provides unique data for a sensitive scenario – a closed door whose sealing has degraded.

Several correlated processes can explain the observed deterioration in smoke control performance. **First** and foremost, multiple opening actions cause friction and gradual wear on seals, which may reduce the sealing material's flexibility and, consequently, lead to a loss of sealing integrity at the edges. **Secondly**, dynamic impacts of the door leaf on the threshold (hitting, minor deformations) can lead to geometric deformations, loss of edge parallel alignment and deteriorated contact between the door leaf and the door frame or threshold. **Thirdly**, multiple cycles can cause loosening of fixing screws or minor loosening of the hinges, which extends the linear gaps and increases leakage. The mechanism is supported by observations presented in [25], where installation quality and minor enlargement of the gaps significantly affected the smoke control performance.

The differences in the measurement results at 20°C and 200°C suggest additional thermomechanical phenomena: **at high temperatures, the sealing material characteristics change** (modulus of elasticity, deformability), **which can compensate for some of the leakage observed in cold conditions or, conversely, lead to a different gap distribution. Additionally, temperature gradients and air density differences can modify the leakage through the gaps, which requires a further detailed experimental analysis.**

The sealing and construction materials used in the analysed case included thermal spacers made of glass-fibre-reinforced polyamide, polyurethane sealing and silicone-based sealing materials in the installation zone. In the temperature range up to 200°C, their thermal degradation does not occur, but considerable changes to mechanical characteristics can be observed. For glass-fibre-reinforced polyamide, an increase in temperature leads to a decrease in the modulus of elasticity and an increase in susceptibility to deformation. This can promote better fitting of elements in the gap zones. Polyurethane and silicone materials demonstrate improved flexibility at elevated temperatures, which can partially compensate for geometric roughness and sealing service wear and tear. The effects can explain the observed smaller increase in the air leakage rate at 200°C compared to ambient temperature. Flammability and thermomechanical characteristics of the sealing materials used, e.g. in fire doors, were studied separately, as broadly presented in [31].

It should be emphasised that the increase in leakage is non-linear as a function of the number of cycles. This suggests that the degradation of seals and fixing elements is gradual, with potential critical points. This can result from cumulative mechanical wear, profile displacement, loosening of the hinges and lock pawl or threshold deformation. In the context of EN 16034 [13], which requires maintaining smoke-control performance throughout the entire service

Zaobserwowane pogorszenie dymoszczelności może być tłumaczone kilkoma skorelowanymi procesami. **Po pierwsze**, wielokrotne otwieranie powoduje tarcie i stopniowe zużycie uszczeltek, co może prowadzić do zmniejszenia sprężystości materiału uszczelniającego, a w konsekwencji utraty ciągłości uszczelnienia występującego na krawędziach. **Po drugie**, dynamiczne oddziaływania skrzydła na próg (uderzenia, niewielkie deformacje) mogą prowadzić do odkształceń geometrycznych, utraty równoległości krawędzi i pogorszenia przylegania między skrzydłem a ościeżnicą lub progami. **Po trzecie**, wielokrotne cykle mogą powodować poluzowanie wkrętów montażowych lub niewielkie luzowanie zawiasów, co poszerza szczeliny liniowe i zwiększa nieuszczelnienie. Wspieraniem dla tych mechanizmów są obserwacje z literatury opisane w pracy [25], gdzie jakość montażu i drobne powiększenie szczelin miały duży wpływ na dymoszczelność.

Różnice w wynikach pomiarów przy 20 i 200°C sugerują dodatkowe zjawiska termomechaniczne: **przy wysokiej temperaturze właściwości materiałów uszczelniających** (moduł sprężystości, odkształcalność) **ulegają zmianie, co może kompensować część nieuszczelnienia widocznych w warunkach zimnych lub odwrotnie – prowadzić do innego rozkładu szczelin. Dodatkowo, gradienty temperatury i różnice gęstości powietrza mogą modyfikować przepływ przez szczeliny, co wymaga dalszej szczegółowej analizy eksperymentalnej.**

W analizowanym przypadku zastosowane materiały uszczelniające oraz konstrukcyjne obejmowały m.in. przekładki termiczne z poliamidu wzmocnionego włóknem szklanym, uszczelnienia poliuretanowe oraz silikonowe materiały uszczelniające w strefie montażowej. W zakresie temperatury do 200°C nie dochodzi do ich degradacji termicznej, jednak obserwowane mogą być istotne zmiany właściwości mechanicznych. W przypadku poliamidu wzmocnionego włóknem szklanym zwiększenie temperatury prowadzi do obniżenia modułu sprężystości i zwiększenia podatności na odkształcenia, co może sprzyjać lepszemu dopasowaniu elementów w strefach szczelinowych. Z kolei materiały poliuretanowe i silikonowe wykazują zwiększoną elastyczność w podwyższonej temperaturze, co może częściowo kompensować nierówności geometryczne i zużycie uszczeltek powstałe w wyniku eksploatacji. Efekty te tłumaczą obserwowaną mniejszą skalę wzrostu przepływu powietrza w temperaturze 200°C w porównaniu z temperaturą otoczenia. Właściwości palne i termomechaniczne materiałów uszczelniających stosowanych m.in. w drzwiach przeciwpożarowych były przedmiotem odrębnych badań opisanych w [31].

Należy podkreślić, że wzrost przepuszczalności jest nieliniowy w funkcji liczby cykli, co sugeruje, że degradacja uszczeltek i elementów mocujących następuje stopniowo, z potencjalnymi punktami krytycznymi. Może to wynikać z kumulującego się zużycia mechanicznego, przemieszczenia profili, poluzowania zawiasów oraz zapadki zamka lub deformacji progu. W kontekście normy EN 16034 [13], która wymaga zachowania dymoszczelności przez cały okres użytkowania, **uzyskane wyniki wskazują na potrzebę regularnych przeglądów i konserwacji drzwi, szczególnie w obiektach o dużym natężeniu ruchu.** Ważnym ograniczeniem za-

life, the results suggest the need for regular door inspections and maintenance, especially in high-traffic facilities. A significant limitation of the observed results is that all smoke control measurements were performed on the same sample consecutively after set cycles, and that in some measurements, reaching the set maximum pressure was impossible (the cases are marked as “n.a.” in Table 1 and result from equipment limitations). Consequently, some results (especially the values at higher pressure) should be interpreted with caution.

The results have significant practical implications, particularly for fire door utilisation in heavy-traffic facilities. The applicable testing and classification procedures do not account for the influence of long-lasting operation on smoke control, which can lead to discrepancies between the declared and actual characteristics during use. Comparing it with the literature, e.g., paper [27] on field tests, one can observe that doors in existing buildings can be characterised as having poorer smoke-control performance than assumed by the “new product” test type. The results presented in this paper explain the mechanism of discrepancy, suggesting that service wear is the primary contributor to degradation. In light of the presented results and the postulates included in [28, 29], it seems appropriate to consider introducing additional requirements for smoke-control durability or mandatory periodic inspections in the product standard.

Conclusions

The tests in this study revealed that long-term use of fire doors, defined as multiple opening and closing cycles, leads to a gradual deterioration in their smoke-control performance, despite maintaining structural integrity and self-closing capability. This means that basic classification requirements can be met while characteristics relevant to evacuation safety deteriorate.

The test results unambiguously confirm that **multiple opening and closing cycles can significantly deteriorate the door's smoke control**. As the number of cycles increases, the air leakage through the gaps also intensifies, indicating a gradual loss of the tested structure's sealing performance. The phenomenon is most apparent at an ambient temperature, where after 300,000 cycles, the flows at 10 Pa and 25 Pa increased by up to 100% relative to the initial condition (from 13.5 to 26.9 m³/h and from 28.0 to 56.7 m³/h).

At elevated temperatures, smoke control performance is also observed, but at a lower scale, suggesting that changes in the sealing material's characteristics after exposure to high temperatures partly compensate for the resulting leakage.

The results suggest that the mechanisms responsible for smoke control deterioration are cumulative and include wear and tear of sealing materials, changes in gap geometry, and potential loosening of fittings and fixings. This also confirms the significance of installation quality – even minor changes

observed in the results is the fact, that all measurements of smoke control were performed on the same sample consecutively after set cycles, and that in some measurements, reaching the set maximum pressure was impossible (marked as n.d. in Table 1 resulting from equipment limitations). This causes that some results (especially the values at higher pressure) should be interpreted with caution.

Obtained results have significant practical implications, especially in the context of the use of fire doors in buildings with high traffic. Existing testing and classification procedures do not take into account the influence of long-term operation on smoke control, which can lead to discrepancies between declared and actual characteristics during use. Comparing it with the literature, e.g., with paper [27] on field tests, one can observe that doors in existing buildings can be characterised as having poorer smoke control performance than assumed by the “new product” test type. The results presented in this paper explain the mechanism of discrepancy, suggesting that service wear is the primary contributor to degradation. In light of the presented results and the postulates included in [28, 29], it seems appropriate to consider introducing additional requirements for smoke control durability or mandatory periodic inspections in the product standard.

Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że długotrwała eksploatacja drzwi przeciwpożarowych, rozumiana jako wielokrotne cykle otwierania i zamykania, prowadzi do systematycznego pogorszenia ich dymoszczelności, mimo zachowania integralności konstrukcyjnej oraz zdolności do samoczynnego zamykania. Oznacza to, że podstawowe wymagania klasyfikacyjne mogą być spełnione, podczas gdy właściwości istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa ewakuacji ulegają degradacji.

Wyniki przeprowadzonych badań jednoznacznie wskazują, że **wielokrotne cykle otwierania i zamykania drzwi mogą znacznie pogorszyć ich dymoszczelność**. Wraz z rosnącą liczbą cykli obserwuje się wyraźne zwiększenie przepływu powietrza przez szczeliny, co świadczy o stopniowej utracie właściwości uszczelniających badanej konstrukcji. Zjawisko to jest szczególnie widoczne w warunkach temperatury otoczenia, gdzie po 300 tysiącach cykli przepływy w przypadku ciśnienia 10 i 25 Pa zwiększyły się aż o 100% w porównaniu ze stanem początkowym (z 13,5 do 26,9 m³/h oraz z 28,0 do 56,7 m³/h).

Pogorszenie dymoszczelności występuje również w warunkach podwyższonej temperatury, ale jego skala jest mniejsza, co sugeruje, że zmiany właściwości materiałów uszczelniających pod wpływem wysokiej temperatury kompensują częściowo powstałe nieszczelności.

Uzyskane wyniki wskazują, że mechanizmy odpowiedzialne za pogorszenie dymoszczelności mają charakter kumulacyjny i obejmują zużycie materiałów uszczelniających, zmiany geometrii szczelin oraz możliwe poluzowanie elementów okuć i mocowania. Potwierdza to również znacze-

in the door frame position or larger gaps can lead to noticeable deterioration in smoke control. The scale of the observed changes depends on the test temperature, suggesting a vital role of the sealing material's thermomechanical characteristics.

Due to the test limitations, in particular testing only one specimen and a lack of statistical analysis, the presented results should be treated as initial but vital for future research. They provide a basis for designing extended tests on a larger number of specimens, various sealing systems, and diverse installation conditions, and for discussing the validity of considering smoke-control durability in fire-door assessment procedures.

Received: 07.01.2026

Revised: 05.02.2026

Opublikowano: 22.04.2026

nie jakości montażu – nawet niewielkie zmiany w ustawieniu ościeżnicy lub powiększenie szczelin mogą prowadzić do zauważalnego pogorszenia dymoszczelności. Skala obserwowanych zmian zależy od temperatury badania, co sugeruje istotną rolę właściwości termomechanicznych materiałów uszczelniających.

Ze względu na ograniczenia badania, przede wszystkim testowanie jednej próbki i brak analizy statystycznej, przedstawione wyniki należy traktować jako wstępne, ale istotne z punktu widzenia dalszych prac badawczych. Stanowią one podstawę do projektowania rozszerzonych badań obejmujących większą liczbę próbek, różne systemy uszczelnienia oraz zróżnicowane warunki montażowe, a także do dyskusji nad zasadnością uwzględniania trwałości dymoszczelności w procedurach oceny drzwi przeciwpożarowych.

Artykuł wpłynął do redakcji: 07.01.2026 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 05.02.2026 r.

Opublikowano: 22.04.2026 r.

Literatura

- [1] Cox G. The challenge of fire modelling. *Fire Saf. J.* 1994. DOI: 10.1016/0379-7112(94)90021-3.
- [2] Marchant EW. Effect of wind on smoke movement and smoke control systems. *Fire Saf. J.* 1984. DOI: 10.1016/0379-7112(84)90008-0.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.job.2022.104224.
- [8] 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.
- [9] Sun Y, Luo Z, Wei K, Wang T, Han G. Numerical Analysis of Fluid-Structure Interaction of Fire Doors in Cross-Passages of Subway Tunnels. *J. Vib. Test. Syst. Dyn.* 2021. DOI: 10.5890/JVTSD.2021.03.002.
- [10] Izydorezyk 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*, pp. 1 – 8.
- [11] Labes WG, Waterman TE, Varley RB. Development of Standard Fire Test Rating Systems for Shelter Components. Final Report. Chicago, IL, 1966.
- [12] Barylka 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.
- [13] EN 16034:2014 Pedestrian doorsets, industrial, commercial, garage doors and openable windows. Product standard, performance characteristics. Fire resisting and/or smoke control characteristics.
- [14] EN 13501-2:2023 Fire classification of construction products and building elements – Part 2: Classification using data from fire resistance and/or smoke control tests, excluding ventilation services.
- [15] 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.
- [16] Sędlak B, Frączek A, Sulik P. Wpływ zastosowanego rozwiązania progowego na dymoszczelność drzwi przeciwpożarowych. *Materiały Budowlane*. 2016. DOI: 10.15199/33.2016.07.07.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.job.2022.104561.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Sędlak B, Jakimowicz M, Frączek A, Kuczyński K. Wpływ rozwiązania progowego oraz dokładności montażu na dymoszczelność drzwi przeciwpożarowych. *Materiały Budowlane*. 2025. DOI: 10.15199/33.2025.11.09.
- [26] Hung H-Y, Lin C-Y, Chuang Y-J, Luan C-P. Application Development of Smoke Leakage Test Apparatus for Door Sets in the Field. *Fire*. 2022. DOI: 10.3390/fire5010012.
- [27] EN 1191:2013: Windows and doors – Resistance to repeated opening and closing – Test method.
- [28] Sędlak B, Jakimowicz M, Kuczyński K. Influence of mechanical strength on the characteristics of aluminium profiled glazed fire door. *Sci. Reports*. 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-23745-x.
- [29] Sędlak B, Jakimowicz M. Wpływ cyklu otwierania i zamykania na właściwości aluminiowych profilowych przeszkłonych drzwi przeciwpożarowych. *Materiały Budowlane*. 2024. DOI: 10.15199/33.2024.02.07.
- [30] EN 1634-3:2004 Fire resistance and smoke control tests for door and shutter assemblies, openable windows and elements of building hardware. Smoke control test for door and shutter assemblies.
- [31] Mouritz AP, Gibson AG. Fire Properties of Polymer Composite Materials. *SOLID Mech. ITS Appl.*, vol. 143, 2006.