

prof. dr hab. inż. Dorota Brzezińska^{1*)}

ORCID: 0000-0003-4615-4454

Mateusz Brzeziński²⁾

ORCID: 0009-0008-8633-3602

inż. arch. Maria Brzezińska³⁾

ORCID: 0000-0002-9095-817X

Analysis of a smoke system according to PN-B-02877-4:2025, BS 7346-4:2003, DIN 18232-2, and NFPA 204

Analiza wymaganych parametrów instalacji oddymiającej wg PN-B-02877-4:2025, BS 7346-4:2003, DIN 18232-2 i NFPA 204

DOI: 10.15199/33.2025.12.11

Abstract. This article presents a comparative analysis of the requirements for smoke control systems according to the latest Polish standard PN-B-02877-4 (2025), the American NFPA 204, the British BS 7346-4:2003, and the German DIN 18232-2. The research involved calculations and parametric analysis of standard smoke extraction parameters for warehouses of 6–14 m high, with areas 1,600–20,000 m², in two variants – with and without sprinkler systems. The analysis revealed significant differences between the recommendations of the analyzed standards. The requirements of NFPA 204, BS 7346-4:2003, and DIN 18232-2 were found to be 50%, 45%, and 60% lower, respectively, in buildings without sprinklers, and 30%, 38%, and 50% lower with sprinkler systems than PN-B-02877-4. This confirms that the requirements of the PN-B-02877-4 standard are the most stringent, especially in buildings without sprinkler systems, resulting in significantly higher investment and operating costs.

Keywords: smoke ventilation; fire ventilation; warehouses.

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę porównawczą wymagań dotyczących instalacji oddymiających wg najnowszej polskiej normy PN-B-02877-4 (2025), amerykańskiej NFPA 204, brytyjskiej BS 7346-4:2003 oraz niemieckiej DIN 18232-2. Badania polegały na obliczeniach i analizie parametrycznej normowych parametrów oddymiania dotyczących hal o wysokości 6–14 m i powierzchni 1600–20 000 m², w dwóch wariantach – z instalacją tryskaczową i bez niej. Analiza wykazała istotne różnice pomiędzy zaleceniami przeanalizowanych norm. Wymagania norm NFPA 204, BS 7346-4:2003 i DIN 18232-2 okazały się odpowiednio o 50%, 45% i 60% mniejsze w halach bez tryskaczy, oraz o 30%, 38% i 50% z instalacją tryskaczową niż PN-B-02877-4. Potwierdza to, że wymagania normy PN-B-02877-4 są najbardziej rygorystyczne szczególnie w przypadku obiektów niewyposażonych w systemy tryskaczowe, co skutkuje znacznie większymi nakładami inwestycyjno-eksploatacyjnymi.

Słowa kluczowe: wentylacja oddymiająca; wentylacja pożarowa; hale magazynowe.

Limiting the spread of smoke and heat under fire conditions is one of the fundamental fire-safety requirements in buildings. Smoke-control systems make it possible to maintain conditions that allow the safe evacuation of occupants as well as effective firefighting and rescue operations. The removal of smoke and heat in large-volume buildings has been the subject of scientific research for many decades, and its significance for fire safety was already emphasized in the 1960s. One of the first book-length publications on this topic was the British guideline “Smoke control measures in a covered two-story shopping mall having balconies as pedestrian walkways”, published in 1979 [1], which discussed the principles of smoke generation and movement in atrium-type buildings. Another important publication was the Handbook Design of Smoke Control System for Buildings [2], which presented an analysis of smoke-generation mechanisms, smoke stratification, and the influence of room geometry on the effectiveness of

Ograniczenie rozprzestrzeniania się dymu i ciepła w warunkach pożaru jest jednym z podstawowych wymagań bezpieczeństwa pożarowego w budynkach. Instalacje oddymiające pozwalają utrzymać warunki umożliwiające bezpieczną ewakuację ludzi oraz skuteczne działania ratowniczo-gaśnicze. Odprowadzanie dymu i ciepła w obiektach wielokubaturowych stanowi przedmiot badań naukowych od wielu dekad, a jego wpływ na bezpieczeństwo pożarowe zostało podkreślone już w latach sześćdziesiątych XX w. Jedną z pierwszych książkowych publikacji na ten temat były brytyjskie wytyczne „Smoke control measures in a covered two-story shopping mall having balconies as pedestrian walkways” wydane w 1979 r. [1], omawiające zasadę powstawania i rozprzestrzeniania się dymu w obiektach atrialnych. Kolejnym był Handbook Design of Smoke Control System for Building [2], w którym przedstawiono analizę mechanizmów powstawania i stratyfikacji dymu i wpływ geometrii pomieszczenia na efektywność wentylacji pożarowej. Dalsze badania prowadzone w Wielkiej Brytanii i Stanach Zjednoczonych przez Milke [3], Heskestada [4], czy McCaffreya [5] doprowadziły do sformułowania empirycznych równań opisujących przyrost strumienia masowego dymu na drodze jego unoszenia ponad źródłem pożaru

¹⁾ Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

²⁾ Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny

³⁾ Politechnika Łódzka, Wydział Organizacji i Zarządzania

^{*)} Correspondence address: dorota.brzezinska@p.lodz.pl

smoke ventilation. Further research carried out in the United Kingdom and the United States by Milke [3], Heskestad [4], and McCaffrey [5] led to the development of empirical equations describing the increase in smoke mass flow as it rises above the fire source (the plume). These became the foundation for the calculation methods applied, among others, in NFPA 204 [6] and BS 7346-4:2003 [7]. Today, these models are integrated into many engineering tools such as CFAST and FDS, which enable the simulation of fire development and smoke movement [8, 9].

The purpose of smoke-control systems is to ensure appropriate conditions for the evacuation of occupants during a fire by protecting them from unacceptable exposure to flames and smoke, as well as from injury resulting from structural damage to the building. To achieve this, the following conditions must be met:

- 1) a fire occurring within the building should remain a localized fire;
- 2) damage during the fire should not affect the entire building;
- 3) structural damage to the building, including its façade, should not pose a threat to the surroundings of the building [10, 11].

According to literature data and our own observations, in recent years insurers have increasingly begun to specify additional requirements concerning fire protection of industrial halls and the property contained within them [10]. At the same time, studies confirm that preventing a fire from reaching significant dimensions is ensured when automatic water-based fire suppression systems are installed in a building [12]. Primarily due to costs, many investors – especially those responsible for smaller facilities – choose not to install water-based suppression systems, believing that smoke-control systems alone will provide sufficiently effective protection of their buildings against destruction caused by fire. In the types of facilities discussed in this article, smoke-control systems are often not obligatory; however, their use allows for significant relaxation of requirements regarding the fire-resistance class of buildings, permissible fire-zone areas, and even the maximum length of evacuation routes [11]. It should be noted, however, that constructing buildings with fire-resistance class “E” requires that their structural load-bearing capacity ensures at least the safe evacuation of occupants for a specified period of time during a fire, even though no specific fire-resistance rating is formally required for this class.

In July of this year, a new edition of the Polish standard PN-B-02877-4:2025 [13] was published. Its previous version from 2001 [14] was based on percentage-based sizing rules for smoke-ventilation systems relative to the size of the building, an approach that had long been criticized as inconsistent with engineering principles. The new version of the standard is more closely aligned with methods based on determining the required smoke-vent area as a function of the predicted fire size within the building and of parameters that influence the amount of smoke generated during a fire. Its application was intended primarily for warehouse buildings, where design solutions recommended by the American NFPA 204 [6]

(ang. plume). Stało się to fundamentem metod obliczeniowych stosowanych m.in. w NFPA 204 [6] i BS 7346-4:2003 [7]. Modele te są obecnie zintegrowane w wielu narzędziach inżynierskich, takich jak CFAST czy FDS, umożliwiających symulację rozwoju pożaru i ruchu dymu [8, 9].

Celem działania systemów oddymiania jest zapewnienie odpowiednich warunków ewakuacji ludzi podczas pożaru przez ich zabezpieczenie przed niedopuszczalnym oddziaływaniem ognia i dymu, a także możliwością odniesienia obrażeń w wyniku uszkodzenia konstrukcji budynku. Aby można było to zrealizować, konieczne jest spełnienie następujących warunków:

- 1) pożar powstały w budynku powinien zachowywać charakter pożaru lokalnego;
- 2) zniszczenie podczas pożaru nie może dotyczyć całego budynku;
- 3) uszkodzenie budynku, w tym elewacji, nie powinno zagrażać otoczeniu budynku [10, 11].

Z danych literaturowych oraz naszych obserwacji wynika, że w ostatnich latach coraz częściej ubezpieczyciele określają dodatkowe wymagania dotyczące ochrony przed pożarem hal przemysłowych i znajdującego się w nich mienia [10]. Jednocześnie badania potwierdzają, że niedopuszczenie do znacznych rozmiarów pożaru jest gwarantowane w przypadku zastosowania w obiekcie stałych samoczynnych wodnych urządzeń gaśniczych [12]. Ze względu przede wszystkim na koszty, wielu inwestorów, szczególnie mniejszych obiektów, rezygnuje ze stosowania wodnych instalacji gaśniczych, ufając, że ochronę ich obiektów przed zniszczeniem w wyniku pożaru zapewnią w wystarczającym stopniu urządzenia oddymiające. W obiektach omawianych w artykule urządzenia oddymiające nie są często obligatoryjne, ale ich stosowanie pozwala na znaczne złagodzenie wymagań dotyczących klasy odporności pożarowej obiektów i dopuszczalnej powierzchni stref pożarowych, a także długości dróg ewakuacyjnych [11]. Należy jednak pamiętać, że realizacja budynków klasy „E” odporności pożarowej wymaga, aby nośność ich konstrukcji zapewniała w razie pożaru przynajmniej bezpieczną ewakuację użytkowników budynku w określonym czasie, mimo iż nie jest w jej przypadku wymagana żadna klasa odporności ogniowej.

W lipcu bieżącego roku ukazała się w Polsce nowelizacja normy PN-B-02877-4:2025 [13]. Jej poprzednia wersja z 2001 [14] bazowała na zasadach procentowego doboru parametrów systemu oddymiania w stosunku do wielkości obiektu, co od wielu lat było kwestionowane, jako podejście niezgodne z zasadami inżynierskimi. Nowa wersja normy jest bliższa zasadom polegającym na wyznaczaniu wymaganej powierzchni klap dymowych w zależności od przewidywanej wielkości pożaru w budynku i jego parametrów, które mają wpływ na ilość dymu powstającego podczas pożaru. Jej zastosowanie było przede wszystkim dedykowane obiektom magazynowym, w których najczęściej stosuje się obecnie rozwiązywania na bazie obliczeń zalecanych przez amerykańską normę NFPA 204 [6] oraz brytyjską BS 7346-4:2003 [7], które dotyczą ilości dymu na podstawie przyjętego scenariusza rozwoju pożaru, natomiast PN-B-02877-4 proponuje użytkownikom gotowe wartości tabelaryczne klap dymowych. Autorzy

and the British BS 7346-4:2003 [7] – which calculate smoke quantities based on an assumed fire-growth scenario – are currently most commonly used. In contrast, PN-B-02877-4 provides users with tabulated values of smoke-vent areas. The authors of the new Polish standard used the German DIN 18232-2:2007-11 [15] as a model and introduced a similar method of dividing buildings into design groups, each with recommended parameters for smoke-control systems.

In the context of smoke-control design, two approaches are distinguished: prescriptive design and performance-based design. Prescriptive methods rely on sets of tables and simplified procedures intended to ensure safety under typical fire scenarios. These may include national regulations as well as standards and guidelines. Their advantage lies in their simplicity and clarity, while their drawbacks include limited flexibility and frequent over-conservatism [16]. The performance-based approach, on the other hand, allows for consideration of actual fire parameters, such as the heat-release rate curve (HRR curve), the characteristics of combustible materials, and the operation of fire-suppression systems [17].

The NFPA 204 [6] and BS 7346-4:2003 [7] standards are based on the performance-based approach, in which determining the design fire constitutes the starting point for further calculations. The design process includes:

- determining the maximum heat-release rate (HRR) of the fire and its growth rate;
- calculating the volumetric flow of smoke at a selected height corresponding to the lower boundary of the smoke layer;
- determining the required smoke-vent area;
- dividing the hall into smoke zones and locating the smoke-control devices.

Figure 1 presents a diagram of a hall in which smoke is exhausted through vents located in the roof, while replacement air enters through open doors. In the NFPA and BS calculation procedures, the fire power is used first, and then – considering the fire power density – the fire area, fire perimeter, and flame height are determined. Depending on whether the flames reach the smoke layer or terminate below it, the mass flow rate of smoke produced by the convective plume rising from the fire source to the smoke-layer interface is calculated accordingly. Subsequent mathematical relationships allow for determining the vent area required to exhaust the amount of smoke generated according to the assumed design conditions. These standards also define the allowable size of a smoke zone. According to NFPA, the length of a smoke zone should not exceed eight times the height of the building. This means that the higher the hall, the larger the permissible smoke zone. This

nowej polskiej normy wzorowali się na niemieckiej normie DIN 18232-2:2007-11 [15] i zaproponowali podobny sposób podziału budynków na grupy projektowe z przypisanymi im zalecanymi parametrami systemu oddymiania.

W kontekście projektowania systemów oddymiających wyróżnia się dwa podejścia: nakazowe (*ang. prescriptive design*) i na podstawie analizy inżynierskiej (*ang. performance-based design*). Metody nakazowe bazują na zestawach tabel i uproszczonych procedurach, które mają zapewnić bezpieczeństwo w typowych scenariuszach. Mogą to być krajowe przepisy oraz normy i wytyczne. Ich zaletą jest prostota stosowania i jednoznaczność wymagań, wadą – ograniczona elastyczność oraz częsta nadmiarowość [16]. Podejście inżynierskie pozwala natomiast uwzględnić rzeczywiste parametry pożaru, takie jak krzywa wydzielania ciepła (HRR curve), charakterystyka materiałów palnych, czy działanie systemów gaśniczych [17].

Normy NFPA 204 [6] i BS 7346-4:2003 [7] bazują na podejściu inżynierskim (*performance-based*), w którym podstawą jest wyznaczenie pożaru projektowego, stanowiącego podstawę do dalszych obliczeń. Proces obejmuje:

- określenie maksymalnej mocy pożaru (HRR) i szybkości jego rozwoju;
- obliczenie strumienia objętości dymu na danej wysokości, stanowiącej dolną granicę warstwy dymu;
- wyznaczenie wymaganej powierzchni otworów oddymiających;
- podział na strefy dymowe i rozmieszczenie urządzeń.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat hali, z której dym wypływa przez klapy dymowe w dachu, a napływ powietrza uzupełniającego następuje przez otwarte bramy. W procedurze obliczeniowej NFPA i BS wykorzystywana jest moc pożaru, a następnie uwzględniając gęstość mocy pożaru, oblicza się powierzchnię i obwód pożaru oraz wysokość płomieni. W zależności od tego, czy płomienie osiągną wysokość warstwy dymu, czy też kończą się niżej, odpowiednio wyznaczany jest strumień masowy dymu powstającego na drodze konwekcyjnego wznoszenia się słupa dymu od źródła pożaru do dolnej granicy warstwy dymu. Kolejne zależności matematyczne pozwalają na obliczenie powierzchni

klap dymowych, przez które odprowadzana będzie taka ilość dymu, jaka powstaje przy przyjętych założeniach obliczeniowych. Normy te określają jednocześnie dopuszczalną wielkość strefy dymowej. Zgodnie z NFPA długość strefy w żadnym kierunku nie powinna przekraczać ośmiokrotnej wysokości hali magazynowej. Oznacza to, że im wyższa jest hala, tym większa może być strefa dymowa. Założenie to jest poparte badaniami eksperymentalnymi, które dowodzą, że dym płynący pod stropem, zaczyna opadać po wychłodze-

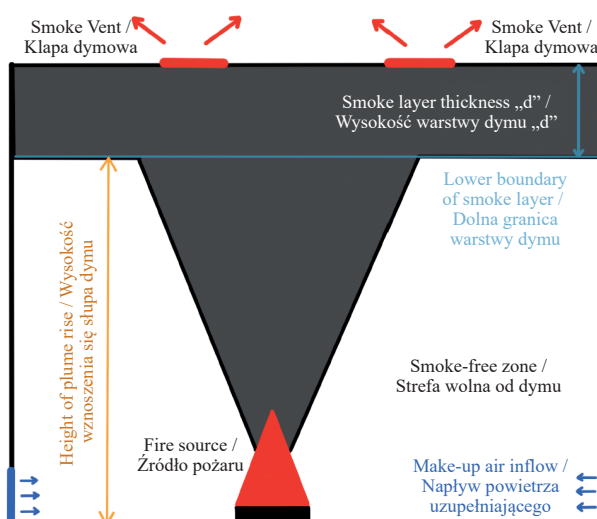


Fig. 1. Scheme of smoke control system in a warehouse
Rys. 1. Schemat oddymiania hali magazynowej

assumption is supported by experimental studies showing that smoke flowing under the ceiling begins to descend after cooling. According to the British standard, which in general has a procedure very similar to the American one, the permissible length of a smoke zone is 60 m, while the maximum smoke-zone area is fixed at 2000 m² [13].

The remaining standards analyzed – DIN 18232-2:2007-11 [15] and PN-B-02877-4:2025 [13] – are classified as prescriptive. In these standards, the design process includes:

- classifying the space into design groups (DG) based on fire-load density;
- reading from tables the required smoke-vent area as a function of hall height and the adopted smoke-free layer depth;
- determining the required area of make-up air openings.

Due to the approach of the new Polish standard being substantially different from those described in NFPA and BS, the question arises as to its consistency with international standards and its ability to ensure that smoke-control systems meet intended design objectives. This article presents a comparison of the requirements of these standards using warehouse buildings of different heights, taking into account the influence of sprinkler-system installation on design outcomes. It also presents computer-simulation results illustrating the effectiveness of selected solutions. The aim was to analyze how the adopted normative models affect the calculated parameters of smoke-control systems in halls of various heights and floor areas, both with and without sprinkler systems. The study had the character of a quantitative normative analysis and included verification of differences between the recommendations of individual standards in terms of smoke-control effectiveness and technical rationality. The research hypothesis stated: *The PN-B-02877-4:2025 standard, in its current form, exhibits a distinctly more conservative character than comparable international standards, which leads to overestimation of the required smoke-vent areas in large-volume buildings, particularly in halls equipped with sprinkler systems.* From this hypothesis follow two main research questions: to what extent do differences in the calculation models of the various standards affect design results in halls of different heights and floor areas, does the application of engineering methods (CFD, performance-based design) confirm the justification for reducing the requirements of PN-B-02877-4 for sprinkler-protected buildings?

Calculation Analyses and CFD Simulations

To compare the requirements for smoke-control systems in warehouse halls as recommended by the standards based on the empirical approach – namely NFPA 204 [6] and BS 7346-4:2003 [7] – with the new Polish standard PN-B-02877-4:2025 [13], the required smoke-vent areas resulting from these standards were determined. In addition, the requirements arising from DIN 18232-2:2007-11 [15], which – as mentioned earlier – served as a reference for the development of the new Polish standard, were also established. The analysis covered halls with heights of 6, 8, 10, 12 and 14 m,

niui się. Zgodnie z normą brytyjską, która generalnie ma procedurę obliczeniową bardzo zbliżoną do amerykańskiej, dopuszczalna z tego względu długość strefy dymowej wynosi 60 m, przy jednocześnie stałej wartości dopuszczalnej powierzchni strefy dymowej 2000 m² [13].

Pozostałe z analizowanych, czyli normy DIN 18232-2:2007-11 [15] i PN-B-02877-4:2025 [13] są zaliczane do nakazowych, w których proces projektowania obejmuje:

- klasyfikację pomieszczeń do grup projektowych (GP), bazującą na gęstości obciążenia ogniowego w hali;
- odczytanie z tabel wymaganej powierzchni oddymiania, zależnej od wysokości hali i przyjętej wysokości warstwy wolnej od dymu;
- wyznaczenie powierzchni otworów napływu powietrza kompensacyjnego.

W związku z odmiennym od opisanego w normach NFPA i BS podejściem do projektowania systemów oddymiania wg nowej polskiej normy nasuwa się pytanie o jej zgodność ze standardami światowymi oraz zapewnienie spełnienia celów projektowych stawianych systemom oddymiania budynków. W artykule przedstawiono porównanie wymagań tych norm na przykładzie obiektów magazynowych o różnej wysokości, z uwzględnieniem wpływu instalacji tryskaczowej na wyniki projektowe. Przedstawiono także wyniki symulacji komputerowych, obrazujące efektywność działania wybranych rozwiązań. Celem była analiza wpływu przyjętych modeli normowych na wyniki obliczeń parametrów instalacji oddymiających w halach o różnej wysokości i powierzchni, w wariantach z instalacją tryskaczową i bez niej. Badanie miało charakter ilościowej analizy normatywnej oraz weryfikacji różnic pomiędzy zaleceniami poszczególnych norm w kontekście skuteczności oddymiania i racjonalności wymagań technicznych. Teza badawcza brzmiała: *Norma PN-B-02877-4:2025 w obecnym brzmieniu wykazuje wyraźnie bardziej konserwatywny charakter niż analogiczne normy zagraniczne, co prowadzi do przeszacowania wymaganych powierzchni oddymiania w obiektach wielkokubaturowych, szczególnie w halach z instalacją tryskaczową.* Wynikają z niej dwa główne pytania badawcze: w jakim stopniu różnice w modelach obliczeniowych poszczególnych norm wpływają na wyniki projektowe w halach o różnej wysokości i powierzchni oraz czy zastosowanie metod inżynierskich (CFD, performance-based design) potwierdza zasadność redukcji wymagań przewidzianych w normie PN-B-02877-4 dotyczącej obiektów z tryskaczami?

Analizy obliczeniowe i symulacje CFD

W celu porównania wymagań dotyczących systemów oddymiania hal magazynowych, zalecanych przez normę bazującą na podejściu empirycznym, zalecanym przez NFPA 204 [6] oraz BS 7346-4:2003 [7] z nową normą polską PN-B-02877-4:2025 [13], dokonano doboru wymaganej powierzchni klap dymowych, jakie wynikają z tych wymagań. Dodatkowo określono wymagania, jakie wynikają z normy DIN 18232-2:2007-11 [15], na której, jak wspomniano wcześniej, wzorowano się w przypadku nowej polskiej normy. Analizie poddano hale o wysokości 6, 8, 10, 12 i 14 m w wariantach bez instalacji tryskaczowej oraz z instalacją tryskaczową.

both without a sprinkler system and with a sprinkler system with an activation temperature of 78°C. In all cases, the same design assumptions were applied.

In the second stage, computer simulations were carried out to compare the effectiveness of smoke-control systems – designed in accordance with the previously determined parameters – based on the most commonly used NFPA standard and the PN-B-02877 standard. For the analysis, the widely used computational fluid dynamics (CFD) model developed by the National Institute of Standards and Technology (NIST) in the USA, the Fire Dynamics Simulator (FDS), was employed. For more than twenty years, it has been used in fire-safety engineering to predict fire behaviour and its impact on buildings and their surroundings. FDS enables the analysis of smoke and fire generation, heat transfer, and the spread of toxic gases during a fire. It also makes it possible to visualise the development of a fire over time, even in very complex geometrical configurations.

In FDS, thermodynamic phenomena are modelled using the Navier–Stokes equations. Heat transfer in the model occurs through convection, conduction and radiation, including the combustion processes that supply heat and affect gas temperature. The mass-transfer model uses advection–diffusion equations to simulate the movement of gases such as oxygen, CO₂ and smoke, and tracks the fuel–air mixture during combustion. FDS models also incorporate evaporation and condensation processes to simulate mass transfer between phases, such as the evaporation of liquid fuels or firefighting water. The software uses rectangular computational grids, which simplifies the numerical solution of the fluid-dynamics equations.

Considering all these capabilities, FDS can be regarded as an appropriate tool for modelling fire-development conditions in warehouse buildings and their suppression with water. It should be noted, however, that the accuracy of simulations depends greatly on grid resolution: finer grids yield more detailed results but require greater computational power. In the simulations carried out, a computational grid with a cell size not exceeding 30 cm in any direction was used, which is the standard resolution adopted for buildings of this type [18–21].

Normative calculations of the required smoke-control system parameters. A fire occurring in a warehouse hall develops until automatic fire-extinguishing systems activate, or until effective firefighting action is initiated, or until all combustible materials are consumed. In the most common firefighting scenario using water streams, the water flow required to stop fire growth is determined from the principle of energy conservation. As demonstrated in the publications of Paul Grimwood [22], stopping fire growth requires supplying 0.385 litres of water per second for each megawatt (MW) of the fire's current heat-release rate. Since one fire engine can deliver 20 litres of water per second through three hoses with 75-mm nozzles of 18-mm diameter, it is capable of halting the growth of a fire of up to 52 MW. Thus, using a standard fire engine, a fast-growing fire can be extinguished if it develops for no longer than 17 minutes [10].

wą o temperaturze zadziałania 78°C. We wszystkich przypadkach bazowano na tych samych założeniach projektowych.

W drugim etapie przeprowadzono symulacje komputerowe, porównujące skuteczność systemów oddymiania o wyznaczonych wcześniej parametrach, najczęściej stosowanej normy NFPA oraz normy PN-B-02877. Do analiz wykorzystano powszechnie stosowany model obliczeniowej mechaniki płynów (CFD), opracowany przez Narodowy Instytut Standardów i Technologii w USA (NIST) – Fire Dynamic Simulator (FDS). Jest on od ponad dwudziestu lat wykorzystywany w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego do przewidywania zachowania się pożaru i jego wpływu na budynki lub otoczenie. FDS umożliwia analizę powstawania dymu i ognia, wymiany ciepła oraz rozprzestrzeniania się toksycznych gazów podczas pożaru. Pozwala także na wizualizację rozwoju pożaru w czasie, nawet w bardzo skomplikowanych układach geometrycznych. W programie FDS zjawiska termodynamiczne modelowane są za pomocą równań Naviera-Stokesa. Wymiana ciepła w modelu odbywa się przez konwekcję, przewodzenie i promieniowanie, z uwzględnieniem procesów spalania, które dostarczają ciepło i wpływają na temperaturę gazu. Model wymiany masy wykorzystuje równania adwekcji-dyfuzji do symulacji ruchu gazów, takich jak tlen, CO₂ i dym oraz śledzi mieszaninę paliwowo-tlenową podczas spalania. Modele FDS wykorzystują również procesy parowania i kondensacji do symulacji przenoszenia masy między fazami, np. parowania paliw ciekłych, czy wody gaśniczej. Oprogramowanie wykorzystuje prostokątne siatki obliczeniowe, co upraszcza numeryczne rozwiązywanie równań dynamiki płynów.

Biorąc pod uwagę wszystkie wymienione możliwości programu FDS, można go uznać za odpowiednie narzędzie do modelowania warunków rozwoju pożaru w obiektach magazynowych i jego gaszenia wodą. Należy jednak pamiętać, że dokładność symulacji w zależy dużym stopniu od rozdzielczości siatki (drobniejsze siatki zapewniają bardziej szczegółowe wyniki, ale wymagają więcej obliczeń). W przeprowadzonych symulacjach użyto siatki obliczeniowej o wymiarze nieprzekraczającym w żadnym kierunku 30 cm, co w tego typu obiektach jest przyjęte jako rozmiar standardowy [18÷21].

Obliczenia normowe wymaganych parametrów instalacji oddymiającej. Zainicjowany w hali magazynowej pożar rozwija się do momentu zadziałania stałych samoczynnych urządzeń gaśniczych lub podjęcia skutecznych działań gaśniczych, ewentualnie aż do całkowitego spalania się materiałów palnych. W najczęściej spotykanym przypadku prowadzenia działań gaśniczych za pomocą prądów wody, strumień wody, niezbędny do przerwania rozwoju pożaru, określany jest z prawa zachowania energii. Jak wykazał w swych publikacjach Paul Grimwood [22], do przerwania rozwoju pożaru niezbędne jest podawanie 0,385 litra wody na sekundę, na każdy megawatt (MW) jego aktualnej mocy. W związku z tym, że jeden samochód ratowniczo-gaśniczy umożliwia podanie 20 litrów wody na sekundę za pomocą trzech prądów wody z prądownic 75 z dyszą 18 mm, pozwala to na przerwanie rozwoju pożaru o mocy do 52 MW. Używając samochodu ratowniczo-gaśniczego, można więc ugasić pożar szybki, jeżeli rozwija się on nie dłużej niż 17 min [10].

In the case where no sprinkler system was assumed, the fire power adopted for calculations – based on the results of Grimwood – was equal to the maximum power a single fire engine can extinguish, i.e., 50 MW. The fire development time was assumed not to exceed 15 minutes. In the variant with a sprinkler system, the fire power was calculated according to the hall height, assuming that the fire develops until sprinkler activation and then becomes suppressed. To standardise the comparison, a fast-growing fire was assumed in the calculations, even though the Polish and German standards allow for a slower, medium-growth fire. The results of the required smoke-vent area are presented in Table 1. The table also shows the permissible smoke-zone sizes according to each standard for every hall analysed, as

W przypadku, kiedy w hali nie zakładano zastosowania instalacji tryskaczowej, moc pożaru przyjęta do obliczeń była równa, zgodnie z opisanymi wcześniej wynikami badań Paula Grimwooda, maksymalnej mocy, jaką jest w stanie ugasić jedna jednostka ratowniczo-gaśnicza, tj. 50 MW. Rozwój pożaru przyjęto w tym przypadku jako nieprzekraczający 15 min. W wariancie z instalacją tryskaczową moc pożaru została obliczona odpowiednio do wysokości hali, przy założeniu, że pożar rozwija się w niej do momentu uruchomienia tej instalacji, a następnie jego rozwój zostaje ograniczony. W celu ujednolicenia porównania, w obliczeniach przyjęto szybki rozwój pożaru, mimo że normy polska i niemiecka dopuszczają pożar łagodniejszy – rozwijający się ze średnią prędkością. Wyniki obliczeń wymaganej powierzchni klap przedstawiono w tabeli 1. Pokazano

Table 1. Calculation results of the required smoke vent area according to the analyzed standards

Tabela 1. Wyniki obliczeń wymaganej powierzchni klap dymowych wg analizowanych norm

Basic assumptions / Podstawowe założenia										
Warehouse height [m] / Wysokość hali [m]	6	8	10	12	14	6	8	10	12	14
Smoke layer height [m] / Wysokość warstwy dymu [m]	4	6	8	10	12	4	6	8	10	12
Sprinklers / Tryskacze	NO / NIE	NO / NIE	NO / NIE	NO / NIE	NO / NIE	78°C	78°C	78°C	78°C	78°C
NFPA 204										
Permitted smoke zone area [m ²] / Dop. pow. strefy dymowej [m ²]	2304	4096	6400	9216	12540	2304	4096	6400	9216	12540
Total fire HRR [kW] / Całkowita moc pożaru [kW]	50 000	50 000	50 000	50 000	50 000	1590	2396	3420	4678	6715
Fire growth time [min] / Czas rozwoju pożaru [min]	<15	<15	<15	<15	<15	3,1	3,8	4,5	5,3	6,3
HRR per unit area [kW/m ²] / Gęstość mocy pożaru [kW/m ²]	3279	4919	6558	8198	10247	3279	4919	6558	8198	10247
Fire parameter [m] / Obwód pożaru [m]	13.8	11.3	9.8	8.8	7.8	2.5	2.5	2.6	2.7	2.9
Smoke dampers and inflow area [m ²] / Pow. klap i napływu [m ²]	19.17	28.23	38.14	48.82	59.97	3.21	7.59	14.62	24.73	38.29
BS 7346-4:2003										
Permitted smoke zone area [m ²] / Dop. pow. strefy dymowej [m ²]	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Convective fire HRR [kW] / Konwekcyjna moc pożaru [kW]	35000	35000	35000	35000	35000	6250	6250	6250	6250	6250
HRR per unit area [kW/m ²] / Gęstość mocy pożaru [kW/m ²]	1200	1200	1200	1200	1200	625	625	625	625	625
Fire parameter [m] / Obwód pożaru [m]	19,14	19,14	19,14	19,14	19,14	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Smoke dampers and inflow area [m ²] / Pow. klap i napływu [m ²]	10.70	17.80	26.60	38.05	51.50	4.40	8.36	14.23	21.70	30.79
PN-B-02877-4										
Design Group / Grupa projektowa	GP3	GP4	GP4	GP5	GP5	GP5	GP2	GP2	GP2	GP2
Permitted smoke zone area [m ²] / Dop. pow. strefy dymowej [m ²]	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
Smoke dampers and inflow area [m ²] / Pow. klap i napływu [m ²]	28.8	68.6	93.4	154.0	209.0	20.0	23.3	31.7	43.1	58.7
DIN18232-2_2007-11										
Design Group / Grupa projektowa	GP4	GP4	GP4	GP4	nd	GP2	GP2	GP2	GP3	nd
Permitted smoke zone area [m ²] / Dop. pow. strefy dymowej [m ²]	1600	1600	1600	1600	nd	1600	1600	1600	1600	nd
Smoke dampers and inflow area [m ²] / Pow. klap i napływu [m ²]	12.6	27.2	39.7	49.2	nd	7.3	12.2	18.0	33.0	nd

well as the basic calculation assumptions. For ease of comparison, the calculation results are presented in Figure 2.

The analysis of calculation results for halls not equipped with a sprinkler system clearly shows a systematic increase in discrepancies between the requirements of BS 7346-4:2003 and NFPA 204, and those of PN-B-02877-4, with respect to the effective smoke-vent area as hall height increases. In low halls, with a height of 6 m, the discrepancies are moderate, although even at this stage the Polish standard prescribes noticeably higher values. As the height increases to 8–10 m, a distinct divergence in the growth dynamics of the required vent area becomes evident. In the calculations based on BS 7346-4:2003 and NFPA 204, the values increase gradually, proportionally to the development of smoke-accumulation phenomena. In the case of PN-B-02877-4, however, the increase is step-like and results in a significant rise in the required vent area. The greatest discrepancies occur in halls higher than 12 m, where the values required by PN-B-02877-4:2025 exceed those obtained according to BS 7346-4:2003 and NFPA 204 by several tens of square metres. This phenomenon indicates a strong tendency toward oversizing smoke-control systems designed in accordance with the national standard. Interestingly, DIN 18232-2:2007-11 is consistent with BS 7346-4:2003 and NFPA 204. It is also worth noting the permissible smoke-zone areas, which in taller halls may be significantly larger according to the American standard than according to the Polish standard – and especially the German one. This means that in most cases, large-area warehouse halls can be designed in accordance with NFPA 204 much more economically – considering the costs associated with smoke-control systems – than when using European standards. The same observation applies to halls equipped with sprinkler systems. In their case, the Polish standard imposes requirements on smoke-control systems that are approximately twice as high. To objectively assess the calculation results presented earlier for the American and Polish standards, computer simulations were carried out for the lowest (6 m) and highest (14 m) halls, both with and without sprinkler systems.

Computer simulation results. Due to the observed discrepancies in the calculated required total effective area of smoke vents according to PN-B-02877-4:2025 and the other standards, computer CFD simulations were performed for the lowest (6 m) and highest (14 m) halls, both with and without sprinkler systems. The results were compared with NFPA 204, which, according to our observations, is the

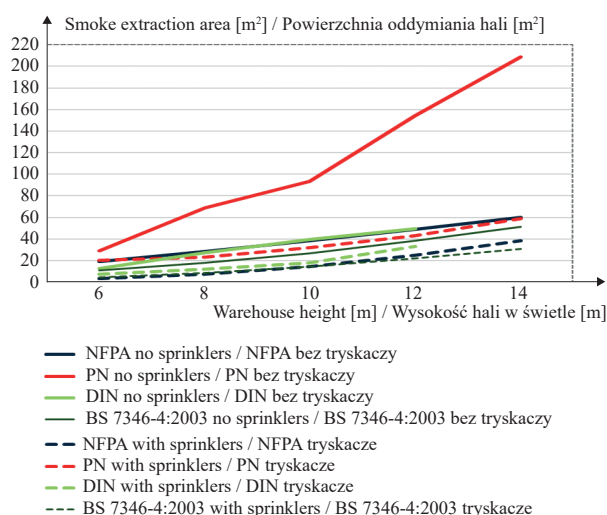


Fig. 2. Required smoke vent area, depending on the warehouse height and sprinkler system presence, according to the analyzed standards

Rys. 2. Wymagana powierzchnia klap dymowych, w zależności od wysokości hali i zastosowania instalacji tryskaczowej wg analizowanych norm

w niej także wielkości stref dymowych, jaka jest dopuszczalna przez normy w przypadku każdej z analizowanych hal, jak również podstawowe założenia przyjęte do obliczeń. W celu ułatwienia porównania, wyniki obliczeń zaprezentowano na rysunku 2.

Przeprowadzona analiza wyników obliczeń, w przypadku hal niewyposażonych w instalację tryskaczową, wskazuje jednoznacznie na systematyczne narastanie różnic pomiędzy wymaganiami norm BS 7346-4:2003 i NFPA 204 a PN-B-02877-4 dotyczącymi powierzchni czynnej klap dymowych wraz ze wzrostem wysokości obiektu. W przypadku hal niskich, o wysokości 6 m,

odnotowane rozbieżności mają charakter umiarkowany, choć już na tym etapie polska norma przewiduje wartości wyraźnie większe. Wraz ze wzrostem wysokości obiektu do poziomu 8–10 m obserwuje się wyraźne zróżnicowanie dynamiki przyrostu wymaganej powierzchni oddymiania. W obliczeniach na bazie BS 7346-4:2003 i NFPA 204 wartości te zwiększają się stopniowo, w sposób proporcjonalny do rozwoju zjawisk związanych z gromadzeniem się dymu. W przypadku PN-B-02877-4 przyrost ten przybiera natomiast charakter skokowy i prowadzi do znacznego zwiększenia powierzchni klap. Największe rozbieżności widoczne są w obiektach wyższych niż 12 m, gdzie wartości wymagane przez PN-B-02877-4:2025 przewyższają uzyskane na podstawie BS 7346-4:2003 i NFPA 204 nawet o kilkadziesiąt metrów kwadratowych. Zjawisko to wskazuje na silną tendencję do przewymiarowania instalacji oddymiających, projektowanych zgodnie z normą krajową. Co ciekawe, norma DIN 18232-2:2007-11 jest zgodna z normami BS 7346-4:2003 i NFPA 204. Należy tu dodatkowo zwrócić uwagę na dopuszczalne powierzchnie stref dymowych, które w halach wyższych mogą być znacznie większe wg normy amerykańskiej niż wg normy polskiej, a szczególnie niemieckiej. Oznacza to, że w większości przypadków wielkopowierzchniowe hale magazynowe będą mogły być zaprojektowane wg NFPA 204 znacznie oszczędniej, z punktu widzenia nakładów na system oddymiania, niż wg norm europejskich. Podobnie jest w przypadku hal wyposażonych w instalację tryskaczową. W ich przypadku norma polska stawia przed systemami ok. dwukrotnie większe wymagania. W celu dokonania obiektywnej oceny przedstawionych wyników obliczeń wg norm amerykańskiej i polskiej, w przypadku hali najniższej (6 m) i najwyższej (14 m) z instalacją tryskaczową i bez niej, przeprowadzono symulacje komputerowe.

Wyniki symulacji komputerowych. W związku z zaobserwowanymi rozbieżnościami w uzyskanych wynikach obliczeń wymaganej sumarycznej powierzchni czynnej klap dymowych

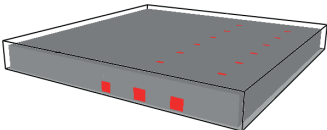
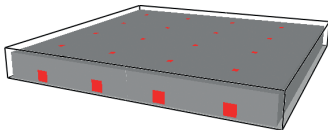
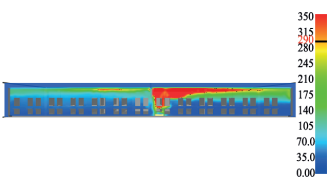
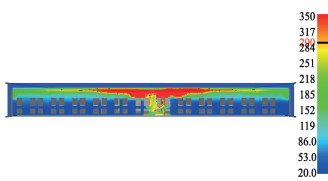
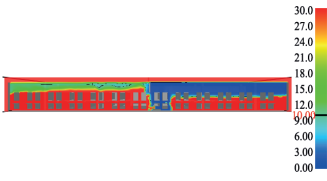
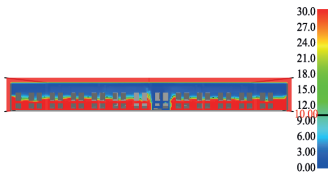
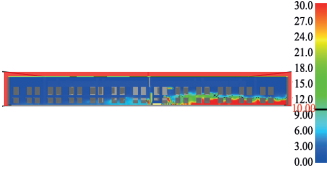
most commonly used standard on the Polish market. To obtain comparable results, unified assumptions were adopted: a hall area of 4000 m² (the maximum permissible smoke-zone area according to the Polish standard); a fast-developing fire; and a simulation duration of 15 minutes. In each case, the smoke-control system had parameters consistent with those presented in Table 1. Additionally, in the analysis of NFPA 204-based solutions, the 6-m hall was divided using a smoke curtain into two smoke zones, because the permissible size of a smoke zone is 2304 m². However, only the smoke vents located within the zone in which the fire occurred were activated. This made it possible to objectively assess whether the significantly larger vent areas required by the Polish standard result in a higher operational effectiveness of the smoke-control system. Tables 2–5 present the results of the computer simulations with respect to temperature distribution and visibility distance for each smoke-control variant. The simulation results are shown for the moment 900 seconds after ignition; additionally, for the 6-m hall, visibility distribution is also presented for time 420 seconds, corresponding to the estimated period during which evacuation of hall occupants would take place. The approximate evacuation time is based on the following assumptions: fire detection by an automatic system at approximately 120 seconds; initiation of evacuation within the next 120 seconds; and traversal of the evacuation route (which may be as long as 225 m) within a maximum of 180 seconds. The actual evacuation time of hall occupants depends on many factors; however, for the purpose of this analysis it was necessary to standardize it across all presented hall variants. A threshold temperature of 350°C was adopted in the analysis, as this value is considered the critical temperature for maintaining the load-bearing capacity of steel structural elements according to Eurocode 3 [23]. Additionally, in the result maps, a temperature value of 290°C is marked in black to reflect

wg PN-B-02877-4:2025 i pozostałych norm, w przypadku hali najniższej (6 m) i najwyższej (14 m) z instalacją tryskaczową i bez niej, przeprowadzono symulacje komputerowe CFD. Wyniki porównano z normą NFPA 204, która zgodnie z naszą obserwacją, jest najczęściej stosowana na polskim rynku. W celu uzyskania porównywalnych wyników przyjęto ujednolicone założenia: powierzchnia hali 4000 m² (maksymalna dopuszczalna powierzchnia strefy dymowej wg normy polskiej); pożar rozwijający się szybko; czas trwania analiz 15 min. W każdym przypadku system oddymiania miał parametry zgodne z przedstawionymi w tabeli 1. Dodatkowo, przy analizie rozwiązań wg NFPA 204, w przypadku hali o wysokości 6 m zastosowano podział kurtyną dymową na dwie strefy dymowe, gdyż dopuszczalna strefa dymowa wynosi 2304 m², pozostawiając jednak klapy dymowe aktywne tylko w strefie dymowej, w której powstał pożar. Pozwoliło to na obiektywną ocenę, czy zalecane przez normę polską znacznie większe powierzchnie instalacji oddymiającej zapewniają wyższy poziom skuteczności działania systemu. Tabele 2–5 przedstawiają wyniki symulacji komputerowych dotyczących rozkładu temperatury i zasięgu widzialności w przypadku poszczególnych wariantów systemu oddymiania. Wyniki symulacji przedstawiono po czasie 900 s od rozpoczęcia pożaru, przy czym, w przypadku hali o wysokości 6 m dodatkowo zaprezentowany został rozkład zasięgu widzialności po czasie 420 s, w którym szacowane jest prze-

prowadzenie ewakuacji użytkowników hali. Przybliżony czas ewakuacji bazuje na założeniach: wykrycia pożaru przez system detekcji w czasie ok. 120 s; rozpoczęciu ewakuacji w ciągu kolejnych 120 s i przebyciu drogi ewakuacyjnej (której długość może wynosić nawet 225 m) w ciągu maksymalnie 180 s. Czas ewakuacji użytkowników hali jest uzależniony od wielu czynników. Do celów analizy konieczne było jednak jego ujednolicenie w przypadku wszystkich przedstawionych wariantów hal. Za wartość graniczną temperatury przyjęto w analizach 350°C, co zgodnie z Eurocode 3 uznawane jest za temperaturę krytyczną z punktu

Table 2. Computer simulation results for a 6-meter-high warehouse without sprinklers

Tabela 2. Wyniki symulacji komputerowej w przypadku hali o wysokości 6 m bez tryskaczy

Characteristic / Charakterystyka	NFPA 204	PN-B-02877-4
Warehouse model / Model hali		
Temperature t = 900 s / Temperatura po czasie t = 900 s		
Visibility t = 420 s / Widzialność po czasie t = 420 s		
Visibility t = 900 s / Widzialność po czasie t = 900 s		

a 20% uncertainty margin that should be applied to FDS predictions of gas temperatures beneath the ceiling [8].

Discussion

Analysis of normative calculations of the required smoke-ventilation system parameters.

The calculation results presented in the article indicate clear discrepancies between the requirements of PN-B-02877-4 and the remaining standards, both in the variant without sprinklers and in the variant with sprinklers. This stems primarily from the fact that BS 7346-4:2003 and NFPA 204 are based on actual calculations of smoke production, whereas PN-B-02877-4 relies on tabulated values that depend mainly on the height of the smoke layer and the design group. Although the DIN standard also provides guidance in the form of tables, its values are derived from calculations based on relationships that account for heat-release rate, the height of the smoke-free layer, and the overall height of the compartment [11]. In the PN-B-02877-4 approach, increasing the height of the building causes a rapid increase in the required smoke-vent area, regardless of

Table 3. Computer simulation results for a 6-meter-high warehouse with sprinklers
Tabela 3. Wyniki symulacji komputerowej w przypadku hali o wysokości 6 m z tryskaczami

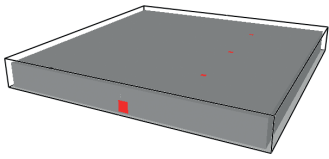
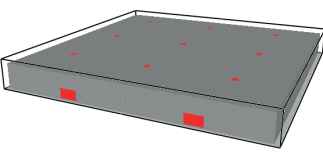
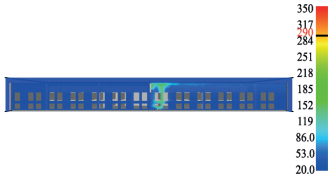
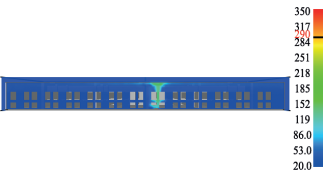
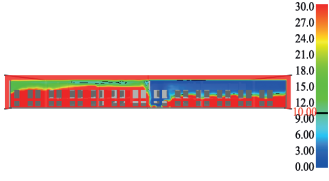
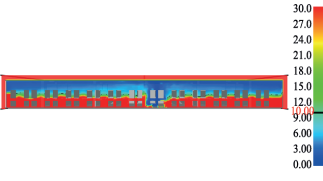
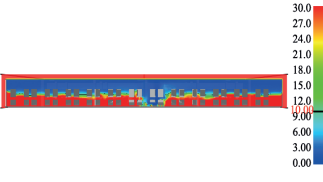
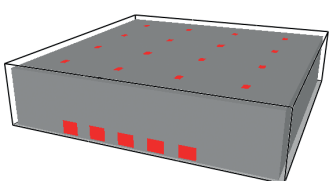
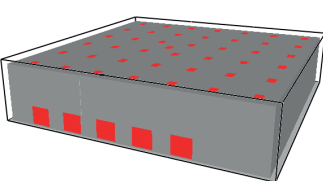
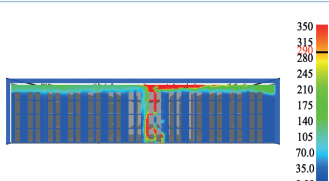
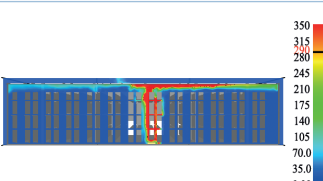
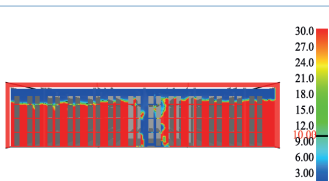
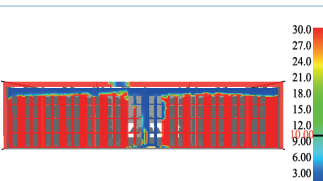
Characteristic / Charakterystyka	NFPA 204	PN-B-02877-4
Warehouse model / Model hali		
Temperature t = 900 s / Temperatura po czasie t = 900 s		
Visibility t = 420 s / Widzialność po czasie t = 420 s		
Visibility t = 900 s / Widzialność po czasie t = 900 s		

Table 4. Computer simulation results for a 14-meter-high warehouse without sprinklers
Tabela 4. Wyniki symulacji komputerowej w przypadku hali o wysokości 14 m bez tryskaczy

Characteristic / Charakterystyka	NFPA 204	PN-B-02877-4
Warehouse model / Model hali		
Temperature t = 900 s / Temperatura po czasie t = 900 s		
Visibility t = 900 s / Widzialność po czasie t = 900 s		

widzenia nośności elementów stalowych [23]. Jednocześnie, na skali wyników kolorem czarnym oznaczono wartość 290°C, która uwzględnia 20% niepewność, jaką należy przyjmować w przypadku programu FDS w aspekcie wartości temperatury modelowanej pod stropem [8].

Dyskusja

Analiza obliczeń normowych wymaganych parametrów instalacji oddymiającej. Przedstawione w artykule wyniki obliczeń wskazują na wyraźne rozbieżności między wymaganiami normy PN-B-02877-4 a pozostałymi, zarówno w wariancie bez tryskaczy, jak i z ich zastosowaniem. Wynika to przede wszystkim z faktu, że normy BS 7346-4:2003 i NFPA 204 bazują na rzeczywistych obliczeniach ilości dymu, podczas gdy PN-B-02877-4 korzysta z wartości tabelarycznych zależnych przede wszystkim od wysokości strefy dymowej i grupy projektowej. Norma DIN również podaje wytyczne w postaci tabel, ale ich wartości pochodzą z obliczeń, bazujących na zależnościach uwzględniających szybkość uwalniania energii, wysokość warstwy o niewielkim zadymieniu oraz wysokość pomiesz-

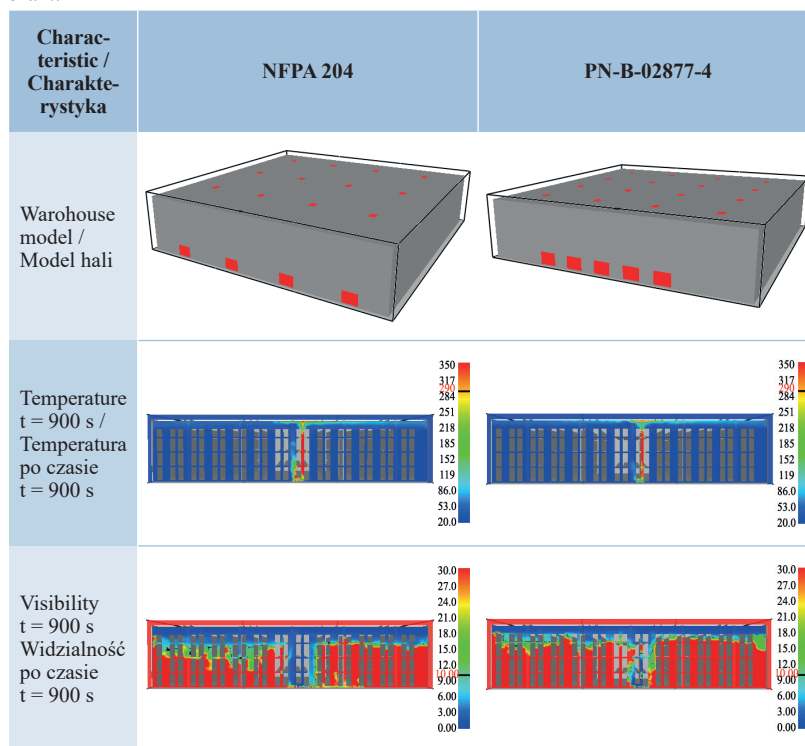
the fire power, which in practice may lead to oversizing the system. The sources of the numerical values included in the Polish standard are unknown, and their divergence from the American standard raises significant concerns.

In the case of sprinkler-protected halls, the differences are also very pronounced. BS 7346-4:2003 and NFPA 204 allow for the dynamic reduction of the design fire power due to the action of sprinklers, which results in a reduction of the required smoke-ventilation capacity – an effect that is particularly noticeable in lower halls. In PN-B-02877-4, the change of the design group associated with the presence of sprinklers does reduce the requirements, but still keeps them at a relatively high level (20–43 m²). As a result, domestic designs may not be able to fully benefit from the advantages provided by sprinklers, even though their effectiveness in limiting fire development has been confirmed in numerous studies [24÷26].

Tables 6 and 7 present an analysis of the differences in the required smoke-vent area according to PN-B-02877-4 and the other standards for four size categories of warehouse halls, with and without sprinkler systems. The percentage comparison was based on the values calculated according to the four standards (NFPA 204, BS 7346-4:2003, DIN 18232-2 and PN-B-02877-4) for halls with heights ranging from 6 to 14 m, in both sprinkler and non-sprinkler variants. The required smoke-vent area according to PN-B-02877-4 was taken as the reference value (100%), and the remaining standards were expressed as a percentage relative to the Polish standard.

The analysis was carried out on the basis of comparing the requirements of four standards for designing smoke-ventilation systems in industrial and warehouse halls: PN-B-02877-4, NFPA 204, BS 7346-4:2003 and DIN 18232-2. The required effective vent areas for halls of 6–14 m in height, with and without sprinkler protection ($T = 78^{\circ}\text{C}$), as listed in Table 1, were recalculated for hall areas of 1600–20,000 m², taking into account the permissible area of a single smoke zone specified by each standard. For this purpose, the number of smoke

Table 5. Computer simulation results for a 14-meter-high warehouse with sprinklers
Tabela 5. Wyniki symulacji komputerowej w przypadku hali o wysokości 14 m z tryskaczami



czenia [11]. W podejściu PN-B-02877-4 zwiększenie wysokości obiektu powoduje szybki wzrost wymaganej powierzchni oddymiania, niezależnie od mocy pożaru, co w praktyce może prowadzić do przewymiarowania instalacji. Nieznane są źródła wartości liczbowych przedstawionych w normie polskiej, ale ich rozbieżność ze standardem amerykańskim budzi duże wątpliwości. W przypadku zastosowania tryskaczy różnice są także bardzo wyraźne. BS 7346-4:2003 i NFPA 204 umożliwiają uwzględnienie dynamicznego obniżenia mocy

obliczeniowej pożaru ze względu na działanie tryskaczy, co skutkuje redukcją wymagań dotyczących instalacji oddymiającej, widoczną szczególnie wyraźnie w niskich halach. W PN-B-02877-4 zmiana grupy projektowej, związana z instalacją tryskaczową, zmniejsza wprawdzie wymagania, lecz w dalszym ciągu utrzymuje je na relatywnie wysokim poziomie (20–43 m²). Może to powodować, że w projektach krajowych nie można w pełni wykorzystać korzyści wynikających z obecności tryskaczy, mimo że ich skuteczność w ograniczaniu rozwoju pożaru jest potwierdzona wieloma badaniami [24÷26].

W tabelach 6 i 7 przedstawiono analizę różnic wymaganej powierzchni oddymiania wg PN-B-02877-4 i pozostałych norm w przypadku czterech przedziałów wielkości hal magazynowych, odpowiednio z instalacją tryskaczową i bez niej. Podstawą opracowania procentowych porównań była analiza wartości obliczonych wg czterech norm (NFPA 204, BS 7346-4:2003, DIN 18232-2 i PN-B-02877-4) i dotyczyła hal o wysokości 6–14 m, w wariantach z tryskaczami i bez nich. Za punkt odniesienia przyjęto wartość wymaganej powierzchni kłap dymowych wg PN-B-02877-4 (100%), a pozostałe normy przeliczono jako udział procentowy względem normy polskiej.

Analiza została przeprowadzona na podstawie porównania wymagań czterech norm dotyczących projektowania instalacji oddymiających w halach przemysłowych i magazynowych: PN-B-02877-4, NFPA 204, BS 7346-4:2003 oraz DIN 18232-2. Wartości wymaganej powierzchni czynnej kłap dymowych w przypadku hal o wysokości 6–14 m, zarówno w wariantach z instalacją tryskaczową ($T = 78^{\circ}\text{C}$), jak i bez niej przedstawione w tabeli 1 przeliczono na 1600–20 000 m² z uwzględ-

Table 6. Analysis of differences in smoke extraction area according to PN-B-02877-4 and other standards for warehouses without sprinklers

Tabela 6. Analiza różnic powierzchni oddymiania wg PN-B-02877-4 i pozostałych norm w przypadku hal magazynowych bez instalacji tryskaczowej

Warehouse area (m ²) / Powierzchnia hali [m ²]	NFPA [% PN-B]	BS [% PN-B]	DIN [% PN-B]
1 600 – 4 000	60 – 133	35 – 70	45 – 85
4 000 – 8 000	35 – 80	25 – 55	40 – 70
8 000 – 15 000	25 – 60	20 – 45	35 – 65
15 000 – 20 000	20 – 50	20 – 40	30 – 55

zones required under each standard was first calculated using formula (1):

$$n = \left\lceil \frac{A_{\text{warehouse}}}{A_{\text{max smoke zone}}} \right\rceil \quad (1)$$

where:

$A_{\text{warehouse}}$ — the warehouse area,

$A_{\text{max smoke zone}}$ — maximum smoke zone area according to the standard,

n — required number of zones (rounded up).

The total required flap area was then calculated depending on the smoke zone size:

$$A_{\text{total}} = n \cdot A_{\text{per smoke zone}} \quad (2)$$

The next stage of the analysis was to normalize the obtained results against the Polish standard, which used the values calculated according to PN-B-02877-4 (marked as 100%) as the reference point. For the remaining standards, the ratio of the smoke extraction area required by them to the area expected by the Polish standard was calculated in this way:

$$W_{\text{normy}} = \frac{A_{\text{total}}}{A_{\text{total, PN-B}}} \times 100\% \quad (3)$$

Next, the obtained results were divided into four hall size ranges: 1 600–4 000 m², 4 000–8 000 m², 8 000–15 000 m² and 15 000–20 000 m², which correspond to typical groups of warehouse facilities in Poland (SBU, mid-box, large halls and big-box) [27]. The final results are presented in Tables 6 and 7.

The percentage values determined above for the required smoke vent area in each warehouse size range are presented in the graph below (figure 3). Error bars indicate the midpoints of the tabulated values.

Analysis of CFD simulation results. To verify whether the discrepancies between the requirements of PN-B-02877-4 and the other standards result in significant differences in the effectiveness of smoke-control systems designed according to these different standards, computer simulations were carried out based on the results obtained for PN-B-02877-4 and NFPA 204. These simulations confirmed that the effectiveness of smoke-control systems designed in accordance with NFPA 204 and PN-B-02877-4:2025, despite very large differences in the required system parameters, achieves the

Table 7. Analysis of differences in smoke extraction area according to PN-B-02877-4 and other standards for warehouses with sprinklers

Tabela 7. Analiza różnic powierzchni oddymiania wg PN-B-02877-4 i pozostałych norm w przypadku hal magazynowych z instalacją tryskaczową

Warehouse area (m ²) / Powierzchnia hali [m ²]	NFPA [% PN-B]	BS [% PN-B]	DIN [% PN-B]
1 600 – 4 000	16 – 33	20 – 40	35 – 50
4 000 – 8 000	20 – 40	25 – 45	40 – 55
8 000 – 15 000	25 – 45	30 – 50	45 – 60
15 000 – 20 000	30 – 45	35 – 55	50 – 65

nieniem wartości dopuszczalnej powierzchni pojedynczej strefy dymowej, przewidzianej przez każdą z norm. W tym celu obliczono najpierw liczbę stref potrzebnych w przypadku danej normy wg wzoru (1):

$$n = \left\lceil \frac{A_{\text{hali}}}{A_{\text{dop. pow. str. dym.}}} \right\rceil \quad (1)$$

gdzie:

A_{hali} — powierzchnia analizowanej hali;

$A_{\text{dop. str. sym.}}$ — maksymalna dopuszczalna powierzchnia strefy dymowej wg normy;

n — wymagana liczba stref (zaokrąglona w górę).

Następnie obliczono łączną wymaganą powierzchnię kłap w zależności od wielkości strefy:

$$A_{\text{klap całkowite}} = n \cdot A_{\text{klap na strefę}} \quad (2)$$

Kolejnym etapem analizy była normalizacja uzyskanych wyników względem normy polskiej PN-B-02877-4, w której za punkt odniesienia przyjęto wartości obliczone wg tej normy, oznaczone jako 100%. W przypadku pozostałych norm obliczono w ten sposób stosunek wymaganej przez nie powierzchni oddymiania do powierzchni oczekiwanej przez normę polską:

$$W_{\text{normy}} = \frac{A_{\text{klap całkowite, norma}}}{A_{\text{klap całkowite, PN-B}}} \times 100\% \quad (3)$$

W dalszej kolejności podzielono uzyskane wyniki na cztery przedziały wielkości hal: 1600–4000 m²; 4000–8000 m²; 8000–15 000 m² oraz 15 000–20 000 m², które odpowiadają typowym grupom obiektów magazynowych w Polsce (SBU, mid-box, duże hale i big-box) [27]. Wyniki końcowe przedstawiono w tabelach 6 i 7.

Wyznaczone wartości procentowe wymaganej powierzchni kłap dymowych, w poszczególnych przedziałach wielkości hal magazynowych, przedstawiono na rysunku 3. Słupki błędów pokazują środki przedziałów wartości tabelarycznych.

Analiza wyników symulacji CFD. W celu weryfikacji, czy rozbieżności w wymaganiach normy PN-B-02877-4 i pozostałych norm nie powodują dużych różnic w skuteczności działania systemów oddymiania, zrealizowanych na podstawie różnych norm, w przypadku wyników uzyskanych wg norm PN-B-02877-4 i NFPA 204 przeprowadzono symulacje komputerowe. Potwierdziły one, że skuteczność działa-

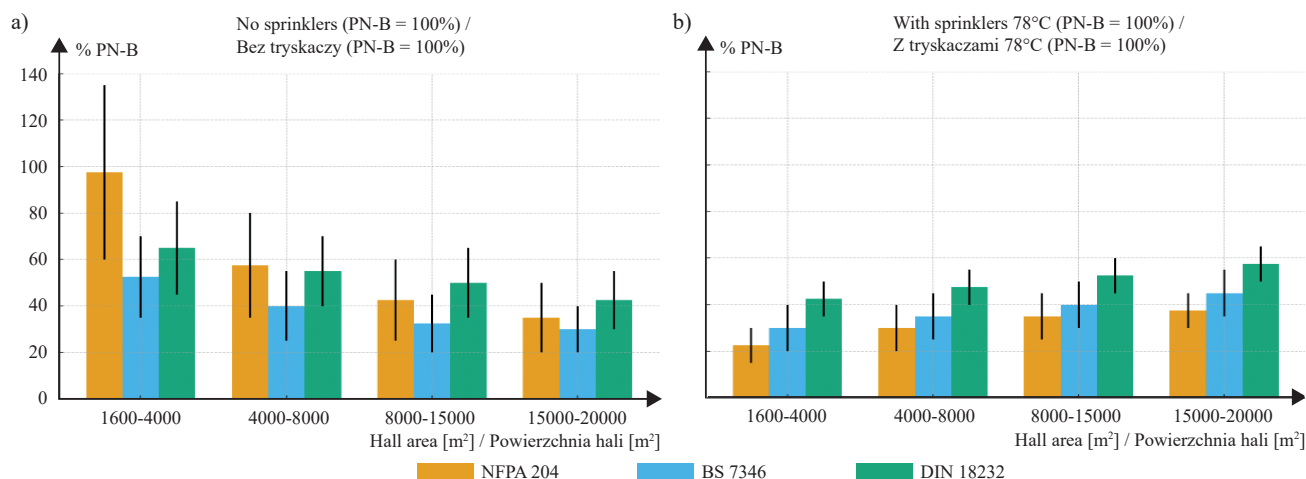


Fig. 3. Percentage values of the required smoke vent area according to NFPA 204, BS 7346-4:2003, and DIN 18232-2 in relation to PN-B-02877-4: a) without sprinklers; b) with sprinklers

Rys. 3. Wartości procentowe wymaganej powierzchni klap dymowych wg NFPA 204, BS 7346-4:2003, DIN 18232-2 w odniesieniu do PN-B-02877-4: a) bez instalacji tryskaczowej; b) z tryskaczami

design objectives at a very similar level. These objectives include ensuring appropriate conditions for the evacuation of building occupants, maintaining a layer of hot smoke beneath the ceiling of the hall, and limiting the spread of high temperatures that could accelerate the loss of structural load-bearing capacity.

The greatest differences in the simulation results occur in the behaviour of the descending smoke layer under the ceiling of the low hall (Tables 2 and 3). According to the Polish standard, after 900 seconds from ignition, the smoke layer remains slightly higher than in the case of the American standard. From the perspective of occupant safety, however, the critical factor is the time available for evacuation, and here significantly better results are achieved using the NFPA 204 solution. Particularly important is the application of a smoke curtain, which in the early stage of the fire limits the spread of smoke beneath the roof of the hall, as well as its cooling and descent, and also restricts the spread of high temperatures under the roof throughout the duration of the fire.

Analysis of the impact of PN-B-02877-4 on the Polish construction market. In recent years, the warehouse-construction market in Poland has been developing exceptionally rapidly. At the end of 2024, the total stock of modern warehouse and logistics space amounted to 33.9–34.5 million m², and in 2024 alone approximately 2.6 million m² of new facilities were delivered [27, 28]. At the same time, demand remained very high – the leasing volume in 2024 exceeded 5.8 million m² [29]. In such a large and competitive sector, fire-safety requirements play an important role, and any differences in normative approaches have a direct impact on investment and operational costs.

The comparison conducted showed that PN-B-02877-4 is more demanding than NFPA 204, BS 7346-4:2003 and DIN 18232-2, which results both from larger required smoke-vent areas and from smaller limits on permissible smoke-zone areas. After scaling the normative smoke-vent areas to real hall sizes in the range of 1600–20,000 m², it was found that the

nia systemów oddymiania, zrealizowanych zgodnie z normą NFPA 204 i PN-B-02877-4_2025, mimo olbrzymich różnic w parametrach systemów oddymiania, realizują na bardzo podobnym poziomie cele projektowe dotyczące zapewnienia odpowiednich warunków ewakuacji ludzi z budynku oraz utrzymania warstwy gorącego dymu pod stropem hali, przy jednoczesnym ograniczeniu zasięgu wysokiej temperatury, która mogłaby spowodować przyspieszenie utraty nośności hali. Największe różnice w wynikach symulacji występują w przypadku obniżania się warstwy dymu pod stropem w hali niskiej (tabele 2 i 3). Zgodnie z normą polską, po czasie 900 s od rozpoczęcia pożaru warstwa dymu utrzymywana jest nieco wyżej, niż wg normy amerykańskiej. Z punktu widzenia bezpieczeństwa użytkowników hali, istotny jest jednak czas przewidywany na ewakuację i tutaj znacznie lepsze rezultaty osiągane są przy rozwiązaniu wg NFPA 204. Szczególnie istotne jest zastosowanie kurtyny dymowej, która w pierwszej fazie pożaru ogranicza rozprzestrzenianie się dymu pod dachem hali oraz jego wychładzanie i opadanie a także rozprzestrzenianie się wysokiej temperatury pod dachem hali w całym okresie trwania pożaru.

Analiza wpływu normy PN-B-02877-4 na polski rynek budowlany. W ostatnich latach rynek budownictwa magazynowego w Polsce rozwija się wyjątkowo dynamicznie. Na koniec 2024 r. całkowity zasób nowoczesnej powierzchni magazynowo-logistycznej wyniósł 33,9–34,5 mln m², przy czym tylko w 2024 r. oddano do użytkowania ok. 2,6 mln m² nowych obiektów [27, 28]. Jednocześnie popyt utrzymywał się na bardzo wysokim poziomie – wolumen transakcji najmu w 2024 r. przekroczył 5,8 mln m² [29]. W tak dużej i konkurencyjnej branży wymagania dotyczące bezpieczeństwa pożarowego odgrywają istotną rolę, a wszelkie różnice w podejściu i eksploatacji obiektów.

Przeprowadzone porównanie wykazało, że PN-B-02877-4 jest bardziej wymagająca niż normy NFPA 204, BS 7346-4:2003 i DIN 18232-2, co wynika zarówno z większych wartości wymaganej powierzchni klap oddymiają-

new Polish standard generates requirements that are 2 to 5 times higher than the foreign standards. This significantly increases construction costs (CAPEX), operating costs (OPEX), and may also extend project timelines. Across the entire market – which delivers more than 2.5 million m² of new space annually – such differences translate into investment expenditures measured in millions. For this reason, broader use of the engineering approach (CFD, performance-based design) and a revision of PN-B provisions toward greater recognition of the role of sprinkler systems should be considered, as this could increase the competitiveness of the Polish market without compromising safety.

The presented results confirm that under Polish conditions there is considerable potential to optimise smoke-control system designs, especially in facilities equipped with effective sprinkler systems, without negatively affecting the performance of smoke-control systems or their ability to achieve key design objectives. It appears that the requirements of PN-B-02877-4 increase the demand for smoke-vent area in a manner that is not fully justified, whereas NFPA 204 maintains a relationship more closely aligned with actual fire conditions. At the same time, additional loads imposed on the roof structure by unnecessary devices may even reduce building safety and shorten the structural stability time, particularly in buildings without sprinkler systems.

Conclusions

The analysis carried out, based on normative calculations and parametric evaluation for warehouse halls with heights ranging from 6 to 14 m and floor areas from 1600 to 20,000 m², constituted a quantitative comparative study of smoke-control system design according to four standards: PN-B-02877-4:2025, NFPA 204, BS 7346-4:2003 and DIN 18232-2. The results showed significant differences between these standards in terms of the required smoke-vent areas and permissible smoke-zone sizes, which stem from the differing calculation models and underlying fire-safety philosophies. In halls without sprinkler systems, the requirements of NFPA, BS and DIN proved to be on average approximately 50% less restrictive than those of PN-B-02877-4, while in sprinkler-protected halls they were about 35% lower.

The obtained results confirm that the new PN-B-02877-4 standard is, with respect to large-volume buildings, the most conservative of all the analysed standards. Its application may lead to substantial oversizing of smoke-vent areas. At the same time, CFD analyses demonstrated that despite the calculation differences, systems designed in accordance with PN-B-02877-4 and NFPA 204 provide a comparable level of effectiveness in terms of maintaining appropriate evacuation conditions for occupants, ensuring structural safety, and securing adequate access for firefighting and rescue teams.

The results of the conducted study confirm that the research objectives were achieved and support the proposed research hypothesis. They hold both cognitive and practical value and

cych, jak i z mniejszych limitów dopuszczalnej powierzchni stref dymowych. Po przeskalowaniu wyników oczekiwanej powierzchni oddymiania, uzyskanych z norm, do rzeczywistych powierzchni hal w przedziale 1600–20 000 m² stwierdzono, że nowa polska norma generuje od 2 do 5 razy większe wymagania niż normy zagraniczne. Skutkuje to znacznym zwiększeniem kosztów budowy (CAPEX), utrzymania (OPEX) oraz potencjalnym wydłużeniem harmonogramów realizacyjnych. W skali całego rynku, który rocznie dostarcza ponad 2,5 mln m² nowej powierzchni, różnice te przekładają się na milionowe nakłady inwestycyjne. Z tego względu należy rozważyć szersze stosowanie podejścia inżynierskiego (CFD, performance-based design) oraz rewizję zapisów PN-B w kierunku większego uznania roli systemów tryskaczowych, co mogłoby zwiększyć konkurencyjność polskiego rynku bez obniżania poziomu bezpieczeństwa.

Przedstawione wyniki analiz potwierdzają, że w warunkach polskich istnieje potencjał do znacznej optymalizacji projektów oddymiania, szczególnie w obiektach wyposażonych w skuteczne instalacje tryskaczowe, bez negatywnego wpływu na skuteczność działania systemu oddymiania i realizacji przez niego głównych celów projektowych. Wydaje się, że wymagania PN-B-02877-4 w sposób nieracjonalny zwiększają zapotrzebowanie na powierzchnię oddymiania, podczas gdy NFPA 204 utrzymuje zależność bliższą rzeczywistym warunkom pożarowym. Jednocześnie dodatkowe obciążenie konstrukcji dachu zbędnymi urządzeniami może nawet pogarszać bezpieczeństwo obiektu i skracać czas stabilności jego konstrukcji, szczególnie w przypadku braku instalacji tryskaczowej.

Wnioski

Przeprowadzona analiza, na podstawie obliczeń normowych i analizy parametrycznej dotyczącej hal magazynowych o wysokości 6–14 m i powierzchni 1600–20 000 m², miała charakter ilościowego badania porównawczego projektowania systemów oddymiania wg czterech norm: PN-B-02877-4:2025; NFPA 204; BS 7346-4:2003 i DIN 18232-2. Wyniki wykazały istotne różnice pomiędzy tymi normami dotyczące wymaganej powierzchni klap dymowych i dopuszczalnych powierzchni stref dymowych, co wynika z odmiennych modeli obliczeniowych i filozofii bezpieczeństwa pożarowego. W halach bez instalacji tryskaczowej wymagania NFPA, BS i DIN okazały się mniej restrykcyjne średnio o ok. 50% niż wg PN-B-02877-4, natomiast w halach z tryskaczami o 35%.

Otrzymane wyniki potwierdzają, że nowa norma PN-B-02877-4 jest, w odniesieniu do obiektów wielkokubaturowych, najbardziej konserwatywna spośród analizowanych norm. Jej zastosowanie może prowadzić do znacznego przewymiarowania powierzchni oddymiania. Jednocześnie, analizy CFD wykazały, że mimo różnic obliczeniowych, systemy zaprojektowane wg PN-B-02877-4 i NFPA 204 zapewniają porównywalny poziom skuteczności systemów oddymiania w aspekcie utrzymania odpowiednich warunków ewakuacji ludzi z hal, bezpieczeństwa konstrukcji czy dostępu ekip ratowniczo-gaśniczych.

form a basis for further simulation and experimental studies. They also constitute grounds for pursuing the harmonisation of national regulations with the engineering approach (performance-based design) to support the development of the warehouse-construction market in Poland.

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły realizację założonych celów pracy i weryfikują postawioną tezę badawczą. Mają one znaczenie poznawcze oraz praktyczne i stanowią podstawę do dalszych badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Stanowią również podstawę do dążenia do harmonizacji krajowych przepisów z podejściem inżynierskim (performance-based design) w celu rozwoju rynku budownictwa halowego w Polsce.

Received: 10.07.2025
Revised: 19.08.2025
Published: 23.12.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 10.07.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 19.08.2025 r.
Opublikowano: 23.12.2025 r.

Literature

- [1] Morgan HP, Marshall NR. *Smoke control measures in a covered two-story shopping mall having balconies as pedestrian walkways*. 1979.
- [2] Klotz JH. *Design of Smoke Control System for Building*, NBS Handbook 141 U.S. 1983.
- [3] Milke JA. "Smoke management for covered malls and atria," *Fire Technol.*, 1990, doi: 10.1007/BF01040110.
- [4] Heskestad G. "SFPE handbook of fire protection engineering Fifth Edition, Chapter 13. Fire plumes," in *SFPE handbook of fire protection engineering Fifth Edition*, 2016, pp. 396–428. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0.
- [5] Loughheed CJ, McCartney GD. "NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC CFD study of the air entrainment of balcony spill plumes at the balcony NRCC-50042," 2008.
- [6] NFPA, *NFPA 204. Standard for Smoke and Heat Venting*. 2024.
- [7] BSI Standards Publication, *BS 7346-4:2003, Components for smoke and heat control systems – recommendations and calculation*. 2004.
- [8] NUREG-1934 and EPRI-1023259, *Nuclear Power Plant Fire Modeling Application Guide (NPP FIRE MAG). Final Report*, no. November 2012. 2012. [Online].
- [9] Dreisbach J, Hill K. "Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications Volume 3 Fire Dynamics Tools (FDT)," 2007.
- [10] Ratajczak D., Brzezińska D. „Oddymianie stalowych hal przemysłowych według standardów europejskich (cz. 1),” *Ochr. Przeciwpowozarowarowa*, vol. 09, pp. 22–26, 2013.
- [11] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie/Regulation of the Minister of Infrastructure of 12 April 2002 on technical specifications for buildings a. Poland, 2018, pp. 1–360. [Online]. Available: https://architektura.info/prawo/warunki_techiczne_budynki.
- [12] Kevin F, et al. "A review of sprinkler system effectiveness studies." *Fire science reviews* 2.1 (2013): 6. <https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzu-dzien-nik-ustaw/ochrona-przeciwpozarowa-16794312>.
- [13] PKN, PN-B-02877-4_2025. *Ochrona przeciwpozarowa budynków Systemy do grawitacyjnego odprowadzania dymu i ciepła Część 4 : Zasady projektowania*. 2006.
- [14] PKN, „PN-B-02877-4_2001. Instalacje grawitacyjne do odprowadzania dymu i ciepła,” no. 15, pp. 1–16, 2001.
- [15] DIN, 1 8232-2:2007-II *Smoke and heat control systems – Part 2: Natural smoke and heat exhaust ventilators; design, requirements and installation*. 2007.
- [16] Drysdale D. *An Introduction to Fire Dynamics*, 3th ed. Wiley, 2011. doi: 10.1201/9780203492727-5.
- [17] Hurley MJ. *SFPE handbook of fire protection engineering Fifth Edition*, Fifth., no. 1. New York: Springer US, 2016. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0.
- [18] Gutiérrez-Montes C, Sanmiguel-Rojas E, Viedma A, Rein G, "Experimental data and numerical modelling of 1.3 and 2.3 MW fires in a 20 m cubic atrium," *Build. Environ.*, vol. 44, no. 9, pp. 1827–1839, 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.12.010.
- [19] McGrattan KB, Hostikka S, Floyd JE, McDermott R. "Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 3: Experimental Validation," vol. 3, no. 1018, 2020.
- [20] McGrattan K, Hostikka S, McDermott R, Floyd J, Vanella M. "Fire Dynamics Simulator User's Guide," *NIST Spec. Publ. 1019 Sixth Ed.*, p. 347, 2019, [Online]. Available: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication1019.pdf>.
- [21] McGrattan K, Hostikka S, McDermott R, Floyd J, Weinschen C, Overhold K. "Sixth Edition Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1 : Mathematical Model," *Natl. Insitute Stand. Technol.*, vol. 1, p. 201, 2019.
- [22] Grimwood P. *Euro Firefighter 2*. West Yorkshire: D&M Heritage Press, 2017.
- [23] PKN, Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-2: Reguly ogolne – Obliczanie konstrukcji na wypadek pożaru, vol. 2005. 2005.
- [24] Bwalya AC, Bénichou N, Sultan MA. "Literature Review on Design Fires," *Proc. Third Int. Conf. 3-D Digit. Imaging Model.*, vol. m, 2003, doi: 10.1039/B910216G.
- [25] F.M.I. Company, "FM Property Loss Prevention Data Sheets," *FM Glob.*, vol. April, p. 187, 2025, [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0679&from=PT%0Ahttp://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52012P-C0011:pt:NOT>.
- [26] Maluk C, Woodrow M, Torero JL. "The potential of integrating fire safety in modern building design," *Fire Saf. J.*, vol. 88, 2017, doi: 10.1016/j.firesaf.2016.12.006.
- [27] CBRE, Poland Industrial & Logistics Figures Q4 2024 – <https://www.cbre.com/insights/figures/poland-industrial-and-logistics-figures-q4-2024> cbre.com (dostęp 3.10.2025).
- [28] Cushman & Wakefield, Poland MarketBeat Industrial Q4 2024 (PDF) — https://assets.cushmanwakefield.com/-/media/cw/marketbeat-pdfs/2024/q4/emea/poland_marketbeat_industrial_2024_q4_en.pdf?rev=fb-14ca43454946e29385cb111810f9b0 assets.cushmanwakefield.com (dostęp 3.10.2025).
- [29] BNP Paribas Real Estate, Industrial Market Q4 2024 (At a Glance) — https://www.realestate.bnpparibas.pl/sites/poland/files/2025-04/AAG%20Industrial_Q4_2024_ENG_Final.pdf realestate.bnpparibas.pl (dostęp 3.10.2025).