

An integrated approach to fire protection of server rack microenvironments in data centers through CFD-based optimization

Zintegrowane podejście do ochrony przeciwpożarowej mikrośrodków szaf serwerowych w centrach danych poprzez optymalizację opartą na obliczeniowej dynamice płynów



DOI: 10.15199/62.2026.7.7

Opracowano metodologię projektowania lokalnych systemów gaśniczych dla środowisk szaf serwerowych. Podejście to połączyło standardowe obliczenia hydrauliczne i obliczenia stężeń z symulacjami numerycznymi wykorzystującymi obliczeniową dynamikę płynów (CFD) oraz analizę wrażliwości. Narzędzia te wykorzystano do oceny rozkładu i utrzymywania się środka gaśniczego Novec 1230 w różnych scenariuszach jego uwalniania.

Słowa kluczowe: pożar, serwer, symulacja CFD, oprogramowanie FDS

A methodol. for designing local extinguishing systems for server rack environments was developed. The approach combined std. hydraulic and concn. calcns. with numerical simulations using computational fluid dynamics and sensitivity analysis. The tools were used to evaluate the distribution and retention of Novec 1230 extinguishing agent under various release scenarios.

Keywords: fire, server, CFD simulation, FDS software

Centra danych są infrastrukturą krytyczną, w której znajdują się serwery, urządzenia sieciowe oraz systemy przechowywania danych. Są one niezbędne do funkcjonowania współczesnych organizacji. Ze względu na dużą gęstość rozmieszczenia urządzeń, złożone systemy elektryczne oraz nieprzerwaną pracę, środowiska te charakteryzują się zwiększonym ryzykiem wystąpienia pożaru. Pożar w centrum danych może prowadzić do znacznej utraty danych, przestojów operacyjnych oraz poważnych strat ekonomicznych. Chociaż normy, takie jak NFPA 2001

Data centers are critical infrastructures that house servers, networking equipment, and data storage. They are essential for the functioning of modern organizations. Due to the high density of equipment, complex electrical systems, and continuous operation, these environments pose an increased risk of fire. A fire in a data center may result in significant data loss, operational downtime, and substantial economic damage. Although standards such as NFPA 2001 and the International Organization for Standardization (ISO 14520) provide general recom-



Doc. Ing. Marianna TOMAŠKOVÁ, PhD. (ORCID: 0000-0001-6281-1501), in 1996 she graduated from the Faculty of Mechanical Engineering of the Technical University in Košice (TUKÉ). In 2001, she received her doctorate at the same faculty in the field of Safety of Technical Systems. Since 2007, she has been an associate professor at the Institute of Special Engineering Processes at TUKÉ. Specialty – fire prevention and application of safety and risks in the field of fire protection.

Doc. dr inż. Marianna TOMAŠKOVÁ, prof. uczelni (ORCID: 0000-0001-6281-1501), w roku 1996 ukończyła studia na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Technicznego w Koszycach (TUKÉ). W 2001 r. na tym samym wydziale uzyskała stopień doktora w dziedzinie bezpieczeństwa systemów technicznych.

Od 2007 r. jest docentem w Instytucie Specjalnych Procesów Inżynierskich macierzystej uczelni. Specjalność – zapobieganie pożarom i stosowanie bezpieczeństwa i ryzyka w dziedzinie ochrony przeciwpożarowej.

* Address for correspondence/Adres do korespondencji:

Faculty of Mechanical Engineering, Department of Quality, Safety and Environment, Technical University of Košice, Letná 1/9 Street, 04200 Košice-Sever, Slovakia, e-mail: marianna.tomaskova@tuke.sk



Ing. Daniela MARASOVA, PhD. (ORCID: 0000-0003-1257-4223) in 2009 she graduated at the BERG Faculty of the Technical University of Košice in the study programme of transport and manipulation systems. She completed the 3rd level of university studies by taking a state examination and defended her thesis in study field – mining mechanization and transport. She completed a study stay at the University of Vasa in Finland. She is a researcher at the Institute of Earth Resources. Specialty – transport, mechanization and earth resources.

Dr inż. Daniela MARASOVA (ORCID: 0000-0003-1257-4223) w roku 2009 ukończyła studia na Wydziale BERG Uniwersytetu Technicznego w Koszycach (TUKÉ) na kierunku Systemy transportowe i manipulacyjne. Ukończyła III stopień studiów wyższych, zdając egzamin państwowy i obroniła pracę dyplomową w dziedzinie mechanizacji i transportu górniczego. Odbiła staż naukowy na Uniwersytecie Vassa w Finlandii. Jest pracownikiem naukowym Instytutu Zasobów Ziemi TUKÉ. Specjalność – transport, mechanizacja i zasoby Ziemi.

oraz Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej ISO 14520, zawierają ogólne zalecenia dotyczące gazowych systemów gaśniczych, nie odnoszą się one w wystarczającym stopniu do mikrośrodków takich jak szafy serwerowe, które charakteryzują się ograniczoną geometrią, złożonym przepływem powietrza, potencjalnymi nieszczelnościami oraz obecnością wrażliwych elementów.

Stałe systemy gaśnicze umożliwiają szybką i automatyczną reakcję na pożar, dzięki czemu zmniejszają ryzyko jego rozprzestrzeniania się oraz ograniczają straty. Pożar szafy elektrycznej jest jednym z częściej występujących rodzajów pożarów elektrycznych. Może on prowadzić do znacznych strat w ludziach oraz rozległych uszkodzeń budynków mieszkalnych, zakładów chemicznych lub innych obiektów. W niniejszym badaniu zaproponowano metodologię badania przyczyn pożarów szaf elektrycznych. Obejmuje ono gromadzenie materiału dowodowego i wnioskowanie, dedukcję wsteczną oraz kompleksową analizę¹⁾. Ich prawidłowe zaprojektowanie i wdrożenie mają kluczowe znaczenie dla bezpiecznego funkcjonowania systemów IT.

W serwerowniach występuje kilka zagrożeń, które mogą prowadzić do pożaru. Pierwszym z nich jest przeciążenie obwodów elektrycznych, ponieważ wysokie zapotrzebowanie energetyczne serwerów może prowadzić do przegrzewania elementów oraz zwarc. Uszkodzone lub nieprawidłowo zainstalowane okablowanie elektryczne stanowi ryzyko iskrzenia i w konsekwencji pożaru oraz przegrzewania się komponentów. Niewystarczające chłodzenie lub awaria wentylacji może prowadzić do przegrzewania i zapłonu urządzeń, akumulatory oraz zasilanie awaryjne mogą generować ciepło lub uwalniać niebezpieczne gazy w przypadku awarii, a materiały palne (kurz, plastikowe osłony oraz materiały izolacyjne w szafie) mogą przyspieszać rozprzestrzenianie się ognia²⁾. Wraz z rozwojem społeczeństwa i postępem technologicznym wykorzystanie energii elektrycznej we współczesnym życiu staje się coraz powszechniejsze. Jednakże ryzyko pożarów elektrycznych również znacząco wzrosło. Dogłębnie przeanalizowano przyczyny, klasyfikację oraz wyzwania związane z pożarami elektrycznymi w środowiskach specjalnych, a także podsumowano zaawansowane technologie wykrywania i gaszenia³⁾. Czynniki te wskazują, że ryzyko pożaru w serwerowniach jest realne. Zapobieganie pożarom w szafach serwerowych wymaga skutecznego monitorowania temperatury, kontroli instalacji elektrycznej oraz niezawodnego systemu gaśniczego, który szybko reaguje na pożar, nie uszkadzając przy tym elektroniki.

Centra danych zyskały w ostatnich latach na znaczeniu, a ich wydajne i niezawodne działanie oraz zarządzanie stało się niezbędne. Oczekuje się, że gęstość wydzielanego ciepła przez szafy serwerowe i urządzenia ICT będzie w przyszłości wzrastać, dlatego konieczne jest utrzymanie odpowiednich warunków temperaturowych w serwerowni, gdzie występuje duże wydzielanie ciepła, aby zapewnić ciągłą pracę systemów. Szczególnie istotne jest przewidy-

mentations for gas extinguishing systems, they do not adequately address microenvironments such as server racks. These are characterized by confined geometry, complex airflow, potential leaks, and the presence of sensitive components.

Fixed fire suppression systems enable a rapid and automated response to a fire, thereby reducing the risk of it spreading and minimizing damage. Electrical cabinet fire is a common type of electrical fire. It can result in significant loss of life and extensive damage to residential buildings, chemical plants or other facilities. This study proposes a methodology for investigating electrical cabinet fires. It includes evidence collection and reasoning, backward deduction and comprehensive analysis¹⁾. Their proper design and implementation are key to the safe operation of IT systems.

There are several risks in server rooms that can lead to a fire. First of all is overloading of electrical circuits because the high energy demands of servers can result in overheating and short circuits. The faulty cabling resulting in damaged or incorrectly installed electrical wiring poses a risk of sparking and subsequent fire, overheating of components. Then the insufficient cooling or ventilation failure can result in overheating and igniting the equipment, the batteries and backup power can generate heat or release hazardous gases in the event of a malfunction, as well as the combustible materials (dust, plastic covers, and insulating materials in the cabine) can accelerate the spread of fire²⁾. With the development of society and the advancement of technology, the use of electricity in modern life has become more and more widespread. However, the risk of electrical fires has also increased significantly. The reasons, classification and challenges of electrical fires in special environments were thoroughly explored and advanced detection and extinguishing technologies were summarized³⁾. The factors indicate that the risk of fire in server rooms is real. Fire prevention in server cabinets requires effective temperature monitoring, electrical system checks, and a reliable fire suppression system that responds quickly to a fire without damaging the electronics.

Data centers have become increasingly important in recent years, and highly efficient and reliable operation and management of data centers is required. It is expected that the heat density generated by racks and information and communication technology equipment will increase in the future, so it is necessary to maintain a suitable temperature environment in the server room where high heat is generated to ensure continuous operation. It is especially important to predict the temperature changes of the rack inlet in the server room when the air conditioning in the computer room is turned off, which may cause a rapid temperature rise. However, it is quite difficult to accurately predict the rack temperature, which in turn makes it difficult to determine the impact on operation in

wanie zmian temperatury na wlocie do szafy w serwerowni w sytuacji, gdy klimatyzacja w centrum danych zostanie wyłączona, co może powodować gwałtowny wzrost temperatury. Jednakże dość trudno jest dokładnie przewidzieć temperaturę szafy serwerowej, co z kolei utrudnia wcześniejsze określenie wpływu takich zmian na pracę systemu⁴⁾. Książka⁵⁾ dotyczy bezpieczeństwa, aktywnej i pasywnej ochrony przeciwpożarowej oraz przedstawia rozwiązania dostępne dla projektantów, które są powszechnie stosowane w centrach danych. W centrach danych czujniki pożarowe wysyłają sygnały alarmowe wykorzystywane do różnych celów, takich jak wykrywanie pożaru, awarii systemu lub zarządzanie zdarzeniami na wcześniej określonym poziomie ryzyka. Skuteczna strategia ochrony przeciwpożarowej obejmuje dokładną ocenę przewidywanego ryzyka oraz jego bieżącą analizę przez cały okres użytkowania obiektu.

Jak podają autorzy⁶⁾, pożary rozdzielnic elektrycznych są częstym rodzajem pożarów elektrycznych. Mogą one prowadzić do znacznych strat w ludziach oraz rozległych uszkodzeń budynków mieszkalnych, zakładów chemicznych lub innych obiektów. Badanie przedstawione w artykule proponuje metodologię analizy pożarów rozdzielnic elektrycznych.

Praca⁷⁾ przedstawia przegląd najnowocześniejszych technologii zwalczania pożarów, opartych na zastosowaniach wizji komputerowej w dziedzinie informatyki i inżynierii. Badanie obejmuje dwustopniową analizę słów kluczowych publikacji. W szczególności w pracy tej przedstawiono analizę bibliometryczną literatury naukowej z bazy Scopus z wykorzystaniem oprogramowania VOS viewer oraz podejścia metodologicznego autorów. W analizie wstępnej zbioru danych zastosowano ogólne słowa kluczowe, a następnie przeprowadzono bardziej szczegółowe badanie z użyciem dodatkowych kryteriów oraz słów kluczowych o większej precyzji. Kategorie uwzględnione w tej pracy są następujące: roboty gaśnicze, wykrywanie pożaru, zwalczanie pożarów, pojazdy latające oraz wizja komputerowa. Wykazano, że badania obejmują techniczne aspekty robotów i systemów gaśniczych, a także rozwój ich oprogramowania i sprzętu. W poniższym przeglądzie podkreślono istotną rolę wizji komputerowej w poprawie wydajności i skuteczności systemów przeciwpożarowych. Zauważono, że kluczowe postępy obejmują rozwój zaawansowanych algorytmów wykrywania pożaru oraz wdrażanie zautomatyzowanych systemów gaśniczych.

Badanie odnosi się również do wyzwań oraz przyszłych kierunków rozwoju w tej dziedzinie, podkreślając potrzebę dalszych innowacji oraz współpracy interdyscyplinarnej. Niniejszy przegląd dostarcza cennych informacji dla naukowców, inżynierów i specjalistów ds. bezpieczeństwa przeciwpożarowego, przedstawiając kompleksowy przegląd najnowocześniejszych technologii oraz ich zastosowań w gaszeniu pożarów.

Pożary w budynkach powodują niepożądane ofiary śmiertelne i straty materialne. Pomimo proponowanych

advance⁴⁾. The book⁵⁾ deals with safety, active and passive fire protection and presents the options available to designers that are commonly used in data centers. In data centers, fire detectors provide emergency signals that serve various purposes, such as detecting fires, system failures, or managing events at a predetermined risk level. A good fire protection strategy involves a thorough assessment of the anticipated risk and an ongoing evaluation of that risk throughout the life of the building.

As the authors state in⁶⁾, electrical switchboard fires are a common type of electrical fire. They can result in significant loss of life and extensive damage to residential buildings, chemical plants, or other facilities. The study in the article proposes a methodology for investigating electrical switchboard fires.

The article⁷⁾ reviews state-of-the-art firefighting technologies based on computer vision applications in the fields of computer science and engineering. The study involves a two-stage keyword analysis of publications. This article presents a bibliographic analysis of the scientific literature from the Scopus database using the VOS viewer software and the authors' methodological approach. General keywords were used for the initial analysis of the dataset, followed by a more detailed study with additional criteria and specific keywords. The categories considered in the article are as follows: firefighting robots, fire detection, fire fighting, aerial vehicles, and computer vision. It is shown that the research covers the technical aspects of firefighting robots and systems, as well as the improvement of their software and hardware. The subsequent review highlights the important role of computer vision in improving the efficiency and effectiveness of firefighting systems. It is noted that key advances include the development of sophisticated fire detection algorithms and the implementation of automated firefighting systems.

The study also addresses challenges and future directions in the field, emphasizing the need for continued innovation and interdisciplinary collaboration. This review provides valuable information for researchers, engineers, and fire safety professionals by offering a comprehensive overview of the state-of-the-art technologies and their applications in fire suppression.

Fires in buildings results in unwanted loss of life and property. Despite fire safety proposals, the frequent occurrence of fires indicates the need for improvements in fire safety management. Conventional fire safety management is based on regulations that separately govern different parties at different stages of the building life cycle. The aim of the study⁶⁾ is to present a conceptual framework for fire safety and risk management based on Building Information The aim of the paper is to design and validate a methodology for local extinguishing of server cabinets using CFD simulations, sensitivity analysis and safety factor with an emphasis on efficiency, human safety and environmental aspects.

rozwiązań w zakresie bezpieczeństwa pożarowego częste występowanie pożarów wskazuje na potrzebę usprawnień w zarządzaniu bezpieczeństwem przeciwpożarowym. Tradycyjne zarządzanie bezpieczeństwem pożarowym opiera się na przepisach, które odrębnie regulują działania różnych stron na różnych etapach cyklu życia budynku. Celem badania⁶⁾ było przedstawienie koncepcyjnych ram dotyczących bezpieczeństwa przeciwpożarowego i zarządzania ryzykiem na podstawie modelu informacji o budynku. Celem niniejszego artykułu jest opracowanie i weryfikacja metodologii lokalnego gaszenia szaf serwerowych z wykorzystaniem symulacji CFD, analizy wrażliwości oraz współczynnika bezpieczeństwa, z naciskiem na wydajność, bezpieczeństwo ludzi i aspekty środowiskowe.

Pożary elektryczne w rozdzielnicach stanowią istotne zagrożenie w Europie i są jedną z głównych przyczyn pożarów w budynkach. Są one głównie związane z awariami elektrycznymi, starzeniem się kabli oraz zwiększonym obciążeniem. Statystyki pożarów centrów danych w latach 2014–2023 przedstawiono na rys. 1.

Część doświadczalna

Materiały

W badaniu wykorzystano środek gaśniczy Novec 1230. Jest to czysty płyn gaśniczy dodekafluoro-2-metylopentan-3-on o wzorze $\text{CF}_3\text{CF}_2\text{C}(\text{O})\text{CF}(\text{CF}_3)_2$ (fluoroketon).

Metodyka badań

Symulacje CFD przeprowadzono w oprogramowaniu FDS⁸⁾. Symulacje CFD śledziły czasową ewolucję stężenia objętościowego środka gaśniczego w charakterystycznych punktach przestrzeni oraz jego spadek po uwolnieniu z systemu. W pracy ograniczono się do standardowych szaf serwerowych 19-calowych stosowanych w środowiskach centrów danych, ze szczególnym uwzględnieniem wczesnych faz pożarów wynikających z awarii elektrycznych, przegrzewania się komponentów lub uszkodzenia izolacji kabli.

Projekt stałego systemu gaśniczego dla szaf serwerowych typu rack

W normie EN 15004-11⁹⁾ określone są wymagania oraz podane zalecenia dotyczące projektowania, instalacji, testowania, konserwacji i bezpieczeństwa gazowych systemów gaśniczych w budynkach, obiektach lub innych strukturach, a także właściwości różnych środków gaśniczych oraz klasy pożarów, dla których środki te są odpowiednie. W porównaniu z FE-36 i zastosowaniem gazów obojętnych, działanie zgodne z tą normą umożliwiało również szybkie wypełnienie przestrzeni przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa ludzi. Zasady projektowania dla różnych środowisk: serwerowni, archiwów oraz stacji transformatorowych (rys. 2); ocena bezpieczeństwa – dobór współczynnika bezpieczeństwa^{10, 11)}; wybór środka gaśniczego⁹⁾.

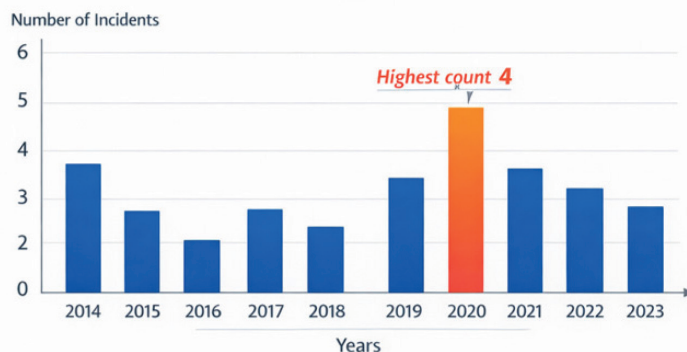


Fig. 1. Data center fire statistics 2014–2023

Rys. 1. Statystyki pożarów w centrach danych w latach 2014–2023

Electrical fires in switchboards are a significant risk in Europe and are one of the leading reasons for fires in buildings. They are mainly related to electrical faults, ageing cables and increased loads. Data center fire statistics 2014–2023 were shown on Fig. 1.

Experimental

Materials

The Novec 1230 fire suppressant was used for the study. It is dodecafluoro-2-methylpentan-3-one with the molecular formula $\text{CF}_3\text{CF}_2\text{C}(\text{O})\text{CF}(\text{CF}_3)_2$, a clean fire suppression fluid (fluoroketone).

Methods

CFD simulations were performed in the FDS software⁸⁾. The CFD simulations tracked the temporal evolution of the volume concentration of the fire suppressant at characteristic points within the space and its decline following release from the system. The paper is limited to standard 19-inch server racks used in data center environments, with an emphasis on early-stage fire scenarios resulting from electrical faults, component overheating, or cable insulation failure.

Design of a fixed firefighting system for rack server cabinets

Standard EN 15004-11⁹⁾ specified requirements and provided recommendations regarding the design, installation, testing, maintenance, and safety of gas fire suppression systems in buildings, facilities, or other structures, as well as the properties of various fire suppression agents and the classes of fires for which these agents are suitable. Compared to FE-36 and inert gases, this standard also allowed for rapid filling of the space while ensuring human safety. Design principles for various environments: servers, archives, and transformer stations (Fig. 2). Safety assessment – selection of safety coefficient^{10, 11)}. Selection of extinguishing agent⁹⁾. Design procedure for a local extinguishing system for server cabinets was presented in Table 1. An overview of fire

Procedura projektowa lokalnego systemu gaszenia dla szaf serwerowych została przedstawiona w tabeli 1. Przegląd systemów gaśniczych dla szaf serwerowych typu rack przedstawiono w tabeli 2.

Obliczenie ilości środka gaśniczego

Obliczenie ilości środków gaśniczych było kluczowe. Podstawowe parametry obliczeniowe zestawiono w tabeli 3.

W przypadku obliczania ilości środka gaśniczego w wybranej szafie serwerowej zalecono jednoznaczne uwzględnienie współczynnika bezpieczeństwa $K_s = 2$, zastosowanego jako konserwatywne założenie projektowe. Podejście to było zgodne z zaleceniami norm i źródeł technicznych, takich jak NFPA 2001 oraz ISO 14520⁽¹²⁾, które podkreślają znaczenie uwzględniania nie szczelności oraz niepewności eksploata-



Fig. 2. Design of a stable fire extinguishing system for rack server cabinets with Novec 1230 extinguishing agent

Rys. 2. Projekt stabilnego systemu gaszenia pożaru dla szaf serwerowych rack z użyciem środka Novec 1230

suppression systems for rack server cabinets was given in Table 2.

Calculation of the amount of extinguishing agent

Calculating the amount of extinguishing agents was crucial. Basic calculation parameters were collected in Table 3.

For the calculation of the amount of extinguishing agent in the selected server rack, it was recommended to explicitly indicate the safety factor $K_s = 2$ used as a conservative design assumption. This approach corresponded to the recommendations of standards and technical sources such as NFPA 2001 and ISO 14520⁽¹²⁾, which emphasized the importance of leaks and operational uncertainties in small, protected volumes. To verify the adequacy of the safety factor $K_s = 2$ was used and a sensitivity analysis was performed, which evaluated the impact of different values of K_s (1.2–2.5) on the amount of extinguishing agent required to protect the server rack ($V = 0.33 \text{ m}^3$) and

Table 1. Design procedure for a local extinguishing system for server cabinets

Tabela 1. Procedura projektowa lokalnego systemu gaszenia dla szaf serwerowych

Step/ Etap	Design phase/ Etap projektowania	Methodological classification/ Klasyfikacja metodologiczna	Input parameters/ Dane wejściowe	Procedure or method/ Procedura lub metoda	Output variables/ Zmienne wyjściowe
1	Definition of cabinet and environmental parameters/ Definicja parametrów szafy oraz parametrów środowiskowych	input data acquisition/ pozyskiwanie danych wejściowych	cabinet dimensions, internal volume, ventilation openings, cable penetrations/ wymiary szafy, objętość wewnętrzna, otwory wentylacyjne oraz przepusty kablowe	geometric characterization of the enclosure and identification of leakage paths/ geometryczna charakterystyka obudowy oraz identyfikacja ścieżek nieszczelności	internal volume V , m^3 , list of leakage points/ objętość wewnętrzna V , m^3 , lista punktów nieszczelności
2	Estimation of ELA/ Szacowanie ELA)	analytical evaluation/ ocena analityczna	dimensions and types of openings/ wymiary i rodzaje otworów	analytical or empirical estimation of ELA/ analityczne lub empiryczne oszacowanie ELA	ELA, m^2
3	Selection of extinguishing agent/ Wybór środka gaśniczego	design decision/ decyzja projektowa	protected equipment characteristic/ charakterystyka chronionego wyposażenia	selection of clean agent suitable for electronic equipment/ dobór środka czystego (clean agent) odpowiedniego dla urządzeń elektronicznych	Novec 1230
4	Identification of critical zones/ Identyfikacja stref krytycznych	system analysis/ analiza systemowa	cabinet layout/ rozmieszczenie elementów w szafie	localization of power supplies, storage devices and network components; zoning of the enclosure/ lokalizacja zasilaczy, urządzeń magazynujących dane oraz komponentów sieciowych; podział obudowy na strefy	zonal cabinet model/ strefowy model szafy
5	Definition of monitoring points/ Określenie punktów pomiarowych	system analysis/ analiza systemowa	critical zones/ strefy krytyczne	selection of representative concentration evaluation points/ wybór reprezentatywnych punktów oceny stężenia	monitoring point set/ zbiór punktów monitoringu
6	Determination of minimum extinguishing concentration/ Wyznaczanie minimalnego stężenia gaśniczego	standards-based calculation/ obliczenia zgodne z normami	extinguishing agent properties/ właściwości środka gaśniczego	calculation according to NFPA 2001 and ISO 14520/ obliczenia zgodnie z NFPA 2001 i ISO 14520	minimum effective concentration/ minimalne skuteczne stężenie, C_{min} , %

7	<i>Application of safety factor/</i> Zastosowanie współczynnika bezpieczeństwa	<i>design calculation/</i> obliczenia projektowe	C_{min} , <i>design assumptions/</i> C_{min} , założenia projektowe	<i>introduction of safety coefficient Ks to account for uncertainties/</i> wprowadzenie współczynnika bezpieczeństwa K_s w celu uwzględnienia niepewności	<i>design concentration/</i> stężenie projektowe, C_n , %
8	<i>Calculation of extinguishing agent quantity/</i> Obliczenie ilości środka gaśniczego	<i>analytical calculation/</i> obliczenia analityczne	V , C_n	<i>determination of required agent mass/</i> wyznaczenie wymaganej masy środka gaśniczego	<i>agent mass/</i> masa środka gaśniczego, m , kg
9	<i>Sensitivity analysis – leakage variation/</i> Analiza wrażliwości – zmienność szczelności	<i>parametric analysis/</i> analiza parametryczna	<i>ELA variation range/</i> zakres zmienności ELA	<i>evaluation of concentration sensitivity to leakage changes/</i> ocena wrażliwości stężenia na zmiany szczelności	<i>concentration envelopes/</i> obwiednie stężenia
10	<i>Sensitivity analysis – safety factor and volume/</i> Analiza wrażliwości – współczynnik bezpieczeństwa i objętość	<i>parametric analysis/</i> analiza parametryczna	K_s , V	<i>robustness assessment of design assumptions/</i> ocena odporności założeń projektowych	<i>critical scenarios/</i> scenariusze krytyczne
11	<i>Design adequacy assessment/</i> Ocena adekwatności projektu	<i>decision process/</i> proces decyzyjny	<i>results of sensitivity analyses/</i> wyniki analizy wrażliwości	<i>verification that $C \geq C_{min}$ in critical zones/</i> weryfikacja, że $C \geq C_{min}$ w strefach krytycznych	<i>acceptable/non-acceptable design/</i> projekt akceptowalny / nieakceptowalny
12	<i>CFD simulation of agent distribution/</i> symulacja CFD rozkładu środka gaśniczego	<i>numerical simulation/</i> symulacja numeryczna	<i>cabinet geometry, agent mass/</i> geometria szafy, masa środka gaśniczego	<i>transient CFD modelling of agent discharge and dispersion/</i> nieustalone modelowanie CFD uwolnienia i dyspersji środka gaśniczego	<i>spatial-temporal concentration fields/</i> przestrzenno-czasowe pola stężenia
13	<i>Hold time evaluation/</i> Ocena czasu utrzymania stężenia	<i>performance assessment/</i> ocena wyników	<i>CFD outputs/</i> wyniki obliczeń CFD	<i>verification of concentration retention above C_{min}/</i> weryfikacja utrzymania stężenia powyżej C_{min}	<i>hold time/</i> czas utrzymania, t_h , s
14	<i>Final system design/</i> Ostateczny projekt systemu	<i>synthesis/</i> synteza	<i>all previous results/</i> wszystkie wcześniejsze wyniki	<i>consolidation of analytical and numerical results/</i> konsolidacja wyników analitycznych i numerycznych	<i>validated system design/</i> zweryfikowany i zatwierdzony projekt systemu
15	<i>Preparation of scientific outputs/</i> Opracowanie wyników naukowych	<i>documentation/</i> dokumentacja	<i>validated design/</i> zweryfikowany i zatwierdzony projekt	<i>preparation of figures, tables and datasets/</i> opracowanie rysunków, tabel i zestawów danych	<i>reproducible documentation/</i> dokumentacja odtwarzalna

Table 2. Overview of fire suppression systems for rack server cabinets

Tabela 2. Przegląd systemów gaśniczych dla szaf serwerowych typu rack

<i>System type/</i> Typ systemu	<i>Operating principle/</i> Zasada działania	<i>Advantages/</i> Zalety	<i>Disadvantages/</i> Wady	<i>Suitability/</i> Odpowiedniość
<i>Gaseous fire suppression systems/</i> Gazowe systemy gaszenia pożaru	<i>release of gas that reduces oxygen concentration or interrupts combustion/</i> uwolnienie gazu obniżającego stężenie tlenu lub przerywającego spalanie	<i>does not damage electronics, no residue, quick system recovery/</i> nie uszkadza elektroniki, nie pozostawia osadów, umożliwia szybkie przywrócenie działania systemu	<i>requires pressure vessels, needs re-filling after activation/</i> wymaga zbiorników ciśnieniowych, wymaga ponownego napełnienia po zadziałaniu	<i>highly suitable for server rooms and racks/</i> doskonale nadaje się do serwerowni i szaf serwerowych
<i>Inert gases/</i> Gazy inertne (IG-541, IG-55)	<i>reduction of oxygen concentration/</i> obniżenie stężenia tlenu	<i>environmentally friendly, safe for equipment/</i> przyjazne dla środowiska, bezpieczne dla urządzeń	<i>requires large storage tanks/</i> wymaga dużych zbiorników magazynowych	<i>larger server rooms/</i> większe serwerownie
<i>Chemical gases/</i> Chemiczne środki gazowe (FM-200, Novec 1230)	<i>chemical interruption of combustion/</i> chemiczne przerywanie procesu spalania	<i>compact solution, high efficiency/</i> kompaktowe rozwiązanie, wysoka efektywność	<i>higher cost/</i> wyższy koszt	<i>racks and smaller spaces/</i> regały i mniejsze przestrzenie
<i>Aerosol systems/</i> Systemy aerozolowe	<i>fine particles interrupt the chemical reaction of combustion/</i> drobne cząstki przerywają chemiczną reakcję spalania	<i>compact, low cost/</i> kompaktowy, niskokosztowy	<i>may leave residues that damage electronics/</i> może pozostawiać osady, które uszkadzają elektronikę	<i>less sensitive IT equipment/</i> mniej wrażliwy sprzęt IT
<i>Chemical fire suppressants/</i> Chemiczne środki gaśnicze (e.g./np. FE-36)	<i>reaction with flame to stop combustion/</i> reakcja z płomieniem prowadząca do przerwania spalania	<i>fast response, no residue/</i> szybkie działanie, brak osadów	<i>possible toxicity, higher refill cost/</i> potencjalna toksyczność, wyższe koszty ponownego napełnienia	<i>specific applications/</i> konkretne zastosowania

Table 3. Basic calculation parameters

Tabela 3. Podstawowe parametry obliczeniowe

Calculation parameter/ Parametry obliczeniowe	Value/Wartość
Volume of protected space/ Wielkość przestrzeni chronionej, V , m ³	0.33
Concentration of extinguishing agent/ Stężenie środka gaśniczego, C , %	5.6
Temperature/Temperatur ^a , T , °C	20
Required amount of extinguishing agent/Wymagana ilość środka gaśniczego ^b , kg	0.544 ^c
Safety coefficient/ Współczynnik bezpieczeństwa ^d , K_s	3.68
NOAEL ^e , % by vol./ % obj.	10
LOAEL ^f , % by vol./ % obj.	above/powyżej 10

^anot specified, assumed to be normal room temperature; ^bthe smallest container provided by the manufacturer is 1 kg, so 1 kg of extinguishing agent (Novec 1230) was used; ^cif $K_s = 2$; ^dsafety during extinguishing must also be taken into account; ^ethe limit below which no adverse effects on humans are observed; ^fwhere effects have already been observed (e.g., irritation, dizziness)/ ^anie określono, przyjęto temperaturę pokojową; ^bnajmniejszy pojemnik dostępny u producenta wynosi 1 kg, dlatego zastosowano 1 kg środka gaśniczego (Novec 1230); ^cprzy $K_s = 2$; ^dnależy również uwzględnić bezpieczeństwo podczas gaszenia; ^ewartość graniczna, poniżej której nie obserwuje się negatywnych skutków dla ludzi; ^fwartość, przy której zaobserwowano już skutki (np. podrażnienie, zawroty głowy)

cyjnych w małych, chronionych przestrzeniach. W celu sprawdzenia adekwatności współczynnika bezpieczeństwa zastosowano wartość $K_s = 2$ oraz przeprowadzono analizę wrażliwości, w ramach której oceniono wpływ różnych wartości K_s (1,2–2,5) na ilość środka gaśniczego wymaganą do zabezpieczenia szafy serwerowej ($V = 0,33$ m³) oraz na czas, przez jaki utrzymywane było wymagane stężenie.

Wyniki badań

Wyniki pokazały, że projektowe stężenie środka gaśniczego jest osiąganе w całej objętości chronionej przestrzeni w krótkim czasie po jego uwolnieniu oraz utrzymuje się powyżej minimalnej wartości skutecznej przez czas wymagany do ugaszenia pożaru. Celem artykułu było jednak wykazanie przydatności CFD jako narzędzia do oceny rozkładu i retencji środków gaśniczych w zamkniętych przestrzeniach technicznych.

Zastosowanie $K_s = 1,2$ wymagało 0,326 kg środka gaśniczego, co stanowiło minimalny margines bezpieczeństwa ze względu na możliwe nieszczelności oraz wentylację. Stężenie było utrzymywane nieznacznie powyżej wartości projektowej 5,6%. Dla $K_s = 2$ (zastosowanego w pierwotnym projekcie) ilość środka gaśniczego wynosiła 0,544 kg, natomiast stężenie było wystarczająco powyżej wartości projektowej i uwzględniało możliwe nieszczelności. Czas utrzymania stężenia był wystarczający do skutecznego zwalczania pożaru. Dla $K_s = 2,5$ ilość środka gaśniczego wzrosła do 0,68 kg, co zapewniało dodatkowy margines bezpieczeństwa, jednak mogło prowadzić do nieuzasadnienie wysokiego stężenia w odniesieniu do limitów NOAEL/LOAEL dla ludzi.

Na podstawie tej analizy zalecono jednoznaczne przyjęcie $K_s = 2$ jako konserwatywnego założenia projektowego. Podejście to było zgodne z normami i zaleceniami technicznymi, takimi jak NFPA 2001 oraz ISO 14520, które podkreślały znaczenie uwzględniania nieszczelności oraz niepewności w małych, chronionych przestrzeniach. Przyjęcie konserwatywnej wartości $K_s = 2$ stanowiło rozsądny kompromis pomiędzy bezpieczeństwem szafy serwerowej a minimalizacją nadmiernego zużycia środka

on the time during which the required concentration was maintained.

Results

The results show that the design concentration of the extinguishing agent is achieved throughout the entire volume of the protected space within a short time interval after release and remains above the minimum effective value for the duration required to extinguish the fire. However, the aim of this article was to demonstrate the applicability of CFD as a tool for assessing the distribution and retention of fire extinguishing agents in enclosed technical spaces.

For $K_s = 1.2$, 0.326 kg of extinguishing agent was required, which represented a minimum safety margin due to possible leaks and ventilation. The concentration was maintained shortly above the design value of 5.6%. For $K_s = 2$ (used in the original design), the amount of extinguishing agent was 0.544 kg, while the concentration was sufficiently above the design value and took into account possible leaks. The concentration holding time was sufficient to effectively attack the fire. For $K_s = 2.5$, the amount of extinguishing agent increased to 0.68 kg, which provided an additional safety margin, but might lead to an unreasonably high concentration with respect to the NOAEL/LOAEL limits for people.

Based on this analysis, it was recommended to explicitly specify $K_s = 2$ as a conservative design assumption. This approach was consistent with standards and technical recommendations such as NFPA 2001 and ISO 14520, which highlighted the importance of leaks and uncertainties in small, protected volumes. The conservative value of $K_s = 2$ provided a reasonable compromise between the safety of the server cabinet and minimizing excessive extinguishing agent consumption, while ensuring sufficient retention time for the design concentration.

The importance of the safety factor K_s was shown from the NFPA perspective. The K_s value in the analysis represented the system's design margin: a higher K_s value (e.g., 2.5) increased the initial concentration and thus the system's resistance to leaks, while a lower K_s value

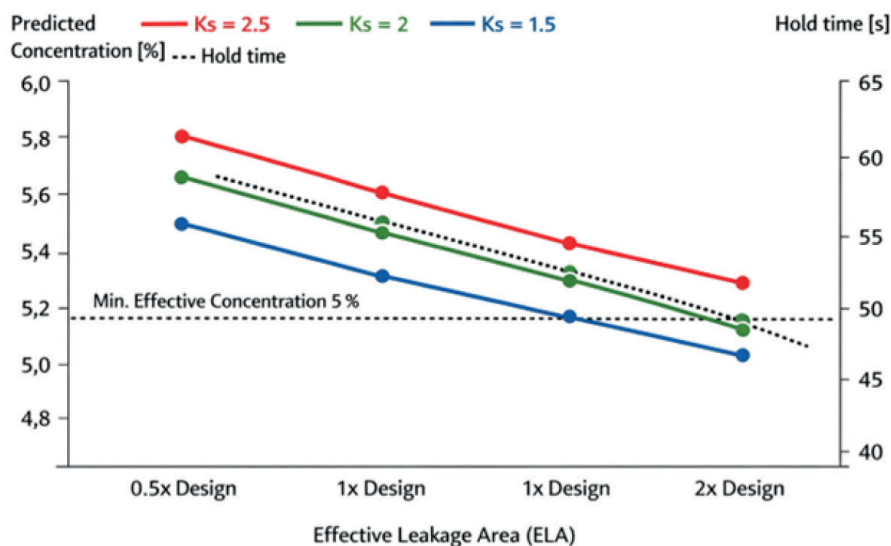


Fig. 3. Sensitivity analysis of Novec 1230 concentration

Rys. 3. Analiza wrażliwości stężenia Novec 1230

gaśniczego, jednocześnie zapewniając wystarczający czas utrzymania stężenia projektowego.

Znaczenie współczynnika bezpieczeństwa K_s zostało przedstawione z perspektywy norm NFPA. W analizie wartość K_s reprezentowała margines projektowy systemu: większa wartość K_s (np. 2,5) zwiększała stężenie początkowe, a tym samym odporność systemu na nieszczelności, natomiast mniejsza wartość K_s (np. 1,5) prowadziła do większej wrażliwości systemu na ELA oraz zmniejszenia marginesu bezpieczeństwa. Analizę wrażliwości stężenia Novec 1230 w funkcji efektywnej powierzchni nieszczelności (ELA) oraz współczynnika K_s przedstawiono na rys. 3. Wykazano, że wyższa wartość K_s oraz mniejsza powierzchnia ELA poprawiają skuteczność systemu Novec 1230, ponieważ pozwalają utrzymać stężenie środka gaśniczego powyżej minimalnego wymaganego progu. Wraz ze wzrostem wartości K_s rosła również wymagana ilość środka gaśniczego (rys. 4). Współczynnik $K_s = 2,0$ stanowił optymalny kompromis pomiędzy skutecznością gaszenia a bezpieczeństwem osób. Wartość $K_s = 2,5$ była dopuszczalna wyłącznie w przestrzeniach nieobsadzonych lub przy zastosowaniu dodatkowych środków technicznych i organizacyjnych. Obliczenie wymaganej ilości środka gaśniczego FK-5-1-12 wykonano zgodnie z normą EN 15004-1, na podstawie objętościowego stężenia środka gaśniczego. Schemat blokowy na rys. 5 przedstawia automatyczny system gaszenia pożaru zaprojektowany do ochrony rozdzielnic elektrycznej.

Omówienie wyników

Chociaż istniejące normy i wytyczne, takie jak NFPA 2001 i ISO 14520, zawierają jasne zalecenia dotyczące projektowania stabilnych systemów gaśniczych wykorzystujących całkowite zalanie, nie ma systematycznej metodologii dotyczącej takich przestrzeni, jak szafy ser-

(e.g., 1.5) led to higher system sensitivity to ELA and reduced the safety margin. A sensitivity analysis of the Novec 1230 concentration as a function of the effective leak area (ELA) and K_s was presented on Fig. 3. It showed that a higher K_s value and a smaller leakage area improved the effectiveness of the Novec 1230 system by maintaining a higher concentration of the extinguishing agent above the minimum required threshold. As the K_s coefficient increased, so did the required amount of extinguishing agent (Fig. 4). The K_s coefficient of 2.0 represented the optimal balance between fire-extinguishing efficiency and personal safety. The K_s value of 2.5 was permissible only in unoccupied spaces or when additional technical and organizational measures are in place.

The calculation of the required quantity of FK-5-1-12 extinguishing agent was performed in accordance with EN 15004-11 based on the volumetric extinguishing concentration. The block diagram in Fig. 5 illustrates an automatic fire suppression system designed to protect an electrical switchgear.

Discussion

Although existing standards and guidelines, such as NFPA 2001 and ISO 14520, provide clear recommendations for designing a stable total flooding fire suppression system, there is no systematic methodology for spaces such as server cabinets. These spaces have a complex internal structure, leaks (cable penetrations, ventilation openings), and a high density of critical components, which can significantly affect the distribution of the extinguishing agent.

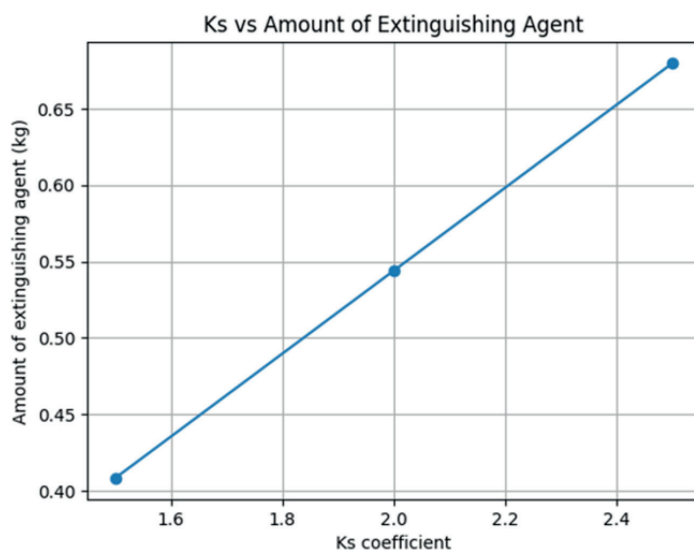


Fig. 4. Relationship between K_s coefficient and extinguishing agent

Rys. 4. Relacja między współczynnikiem K_s a ilością środka gaśniczego

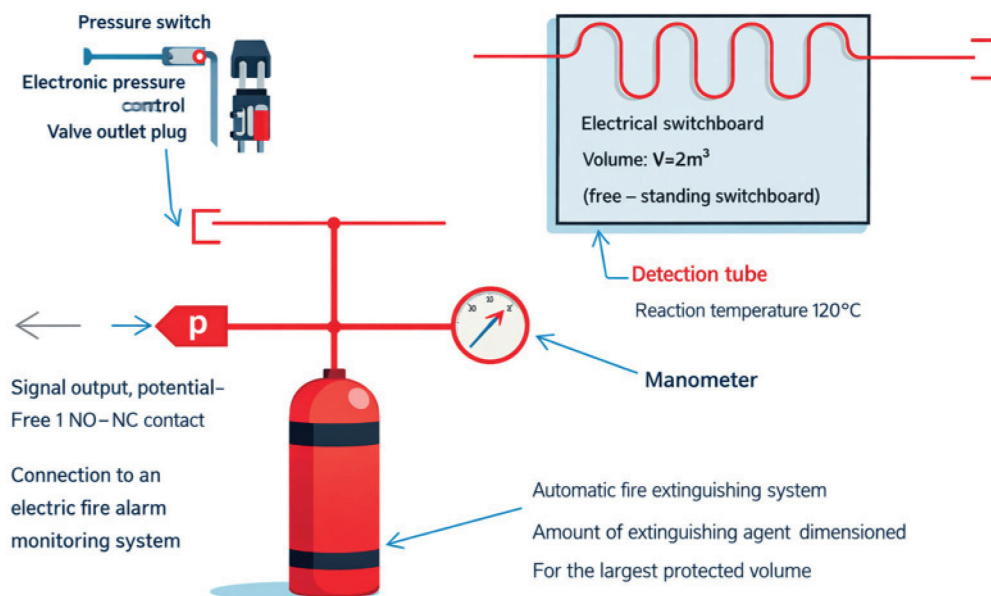


Fig. 5. Block diagram design

Rys. 5. Projekt schematu blokowego

The objective of this article is to propose a methodology for designing a local fire suppression system for a server cabinet that combines standard computational methods with CFD simulations and sensitivity analysis, and to verify that an effective concentration of Novec 1230 is maintained in critical areas of the cabinet under various leak scenarios¹³. The CFD results confirmed rapid attainment of the minimum effective concentration in all critical zones within 3–5 s of system activation. Leakage zones experienced slightly lower concentrations, but $C \geq C_{\min}$ was maintained for the required hold time ($t_h \geq 58$ s). Mesh refinement and boundary condition sensitivity analyses showed that the model predictions were stable and reliable across expected operational variations. Unlike standard codes, which specify design concentrations and volumes of fire suppressants based on empirical tests, this study (i) quantified the distribution of fire suppression agents in small, structured spaces, including leaks such as cable penetrations and ventilation openings, (ii) demonstrated the time history of concentration and heat release rate (HRR) during a localized cable fire, which is not explicitly covered in existing standards, (iii) introduced a methodological innovation: the use of a safety factor and sensitivity analysis for microenvironments as the basis for verifying the design of fire suppression systems for cabinets and similar technical microenvironments, and (iv) enabled the integration of standard recommendations with numerical verification, which can be used as a basis for optimizing the extinguishing agent charge and nozzle placement. The time evolution of the concentration of Novec 1230 extinguishing agent in individual areas of the server cabinet was shown on Fig. 6 (the concentration evolution over dwell time). The colored curves represented different scenarios

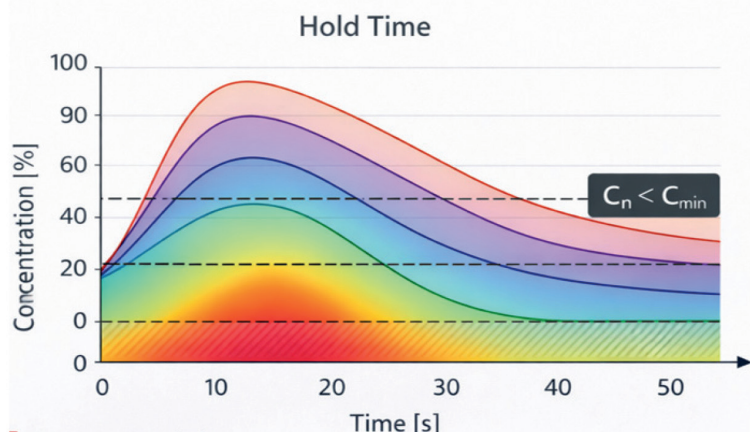


Fig. 6. Time-dependent evolution of the concentration of the Novec 1230 fire suppressant in individual sections of the server cabinet

Rys. 6. Czasowa ewolucja stężenia środka gaśniczego Novec 1230 w poszczególnych sekcjach szafy serwerowej

dział czasu, w którym stężenie spadło poniżej wymaganego progu i nie spełniało już określonego kryterium. Ewolucja czasowa stężenia w punktach pomiarowych oraz spełnienie wymagań czasu przebywania zostały przedstawione na rys. 6 zgodnie z NFPA 2001 i ISO 14520.

Analiza CFD potwierdziła, że rozkład czystej substancji umożliwia osiągnięcie minimalnego stężenia projektowego w chronionej objętości zagrożenia zgodnie z wymaganiami norm EN 15004 oraz NFPA 2001¹⁴). Profile czasowe stężenia środka gaśniczego Novec 1230 wyznaczone z CFD, w porównaniu z minimalnym stężeniem projektowym (MDC) oraz granicą bezpieczeństwa życia NOAEL zgodnie z EN 15004 i NFPA 2001, zostały przedstawione na rys. 7. Przewidywane stężenie oraz czas przebywania określono na podstawie symulacji CFD przeprowadzonej dla stref ewakuacyjnych. Pierwiastek błędu średniokwadratowego RMSE ocenia różnicę pomiędzy przewidywanym stężeniem a projektową wartością odniesienia. Na rys. 8 przedstawiono wpływ indywidualnych zmian parametrów (ELA, K_s , objętość pokrycia) na przewidywane stężenie środka (niebieska linia) oraz czas przebywania (czerwona linia). Można stwierdzić, że wzrost nieszczelności (ELA $\times 2$) powoduje obniżenie stężenia oraz skrócenie czasu przebywania. Wyższy współczynnik bezpieczeństwa ($K_s = 2,5$) nieznacznie zwiększa stężenie oraz czas przebywania. Na podstawie danych przedstawionych na rys. 8 można stwierdzić, że: (i) parametry charakteryzujące się wyższym RMSE (np. ELA $0,5\times$ oraz ELA $2\times$) wykazywały większe odchylenie od stężenia referencyjnego (model był mniej dokładny), oraz (ii) parametry o niskim RMSE (ELA $1\times$, $K_s = 2$) odpowiadały wartości referencyjnej (stanowiły wartości optymalne). Układ wykazywał największą wrażliwość na zmiany współczynnika K_s , wielkości ELA oraz objętości chronionego

or conditions (e.g. ELA, monitoring points). The dashed horizontal lines indicated the reference concentration limits. C_n represented the current (instantaneous) concentration at time t , while C_{min} was the minimum required (limit) concentration. The area marked $C_n < C_{min}$ showed the time period when the concentration dropped below the required threshold value and no longer met the specified criterion. The time evolution of the concentration at the monitoring points and demonstrated compliance with the residence time requirements of NFPA 2001 and ISO 14520 was shown on Fig. 6.

The CFD analysis confirmed that the distribution of the pure substance achieves the minimum design concentration within the protected hazard volume in accordance with the requirements of EN 15004 and NFPA 2001¹⁴). The CFD-derived time-concentration profiles of Novec 1230 extinguishing agent compared to the minimum design concentration (MDC) and the life safety limit NOAEL in accordance with EN 15004 and NFPA 2001 were shown on Fig. 7. The predicted concentration and residence time were based on CFD simulation of the escape zones. The RMSE – Root Mean Square Error – evaluates the difference between the predicted concentration and the design reference value. Figure 8 shows how individual variations of the parameters (ELA, K_s , coverage volume) affect the predicted concentration (blue line) and residence time (red line). It can be stated that an increase in the leak (ELA $2\times$) reduces the concentration and shortens the residence time. A higher safety factor ($K_s 2.5$) slightly increases the concentration and residence time. From the data on Fig. 8 it could be concluded that: (i) parameters with higher RMSE (e.g. ELA $0.5\times$ and ELA $2\times$) differed

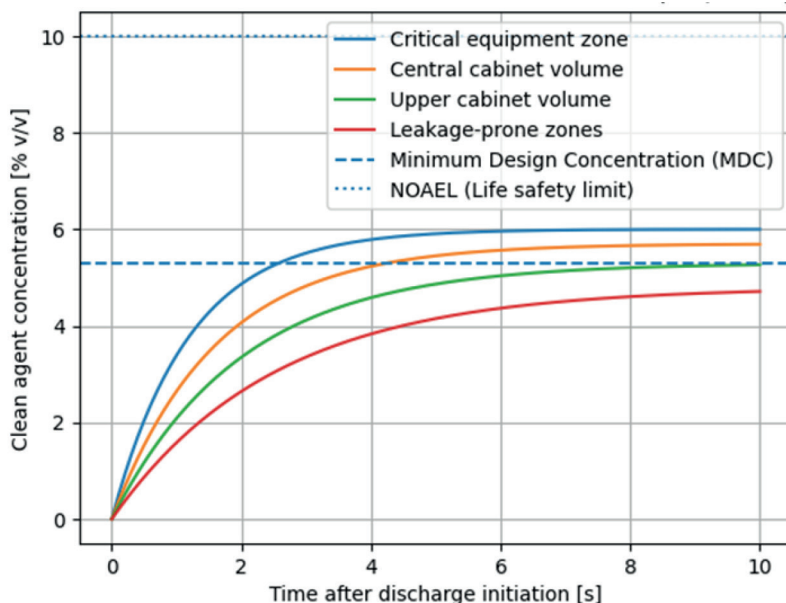


Fig. 7. Time evolution of the concentration of Novec 1230 extinguishing agent in individual areas of the server cabinet

Rys. 7. Czasowa ewolucja stężenia środka gaśniczego Novec 1230 w poszczególnych obszarach szafy serwerowej

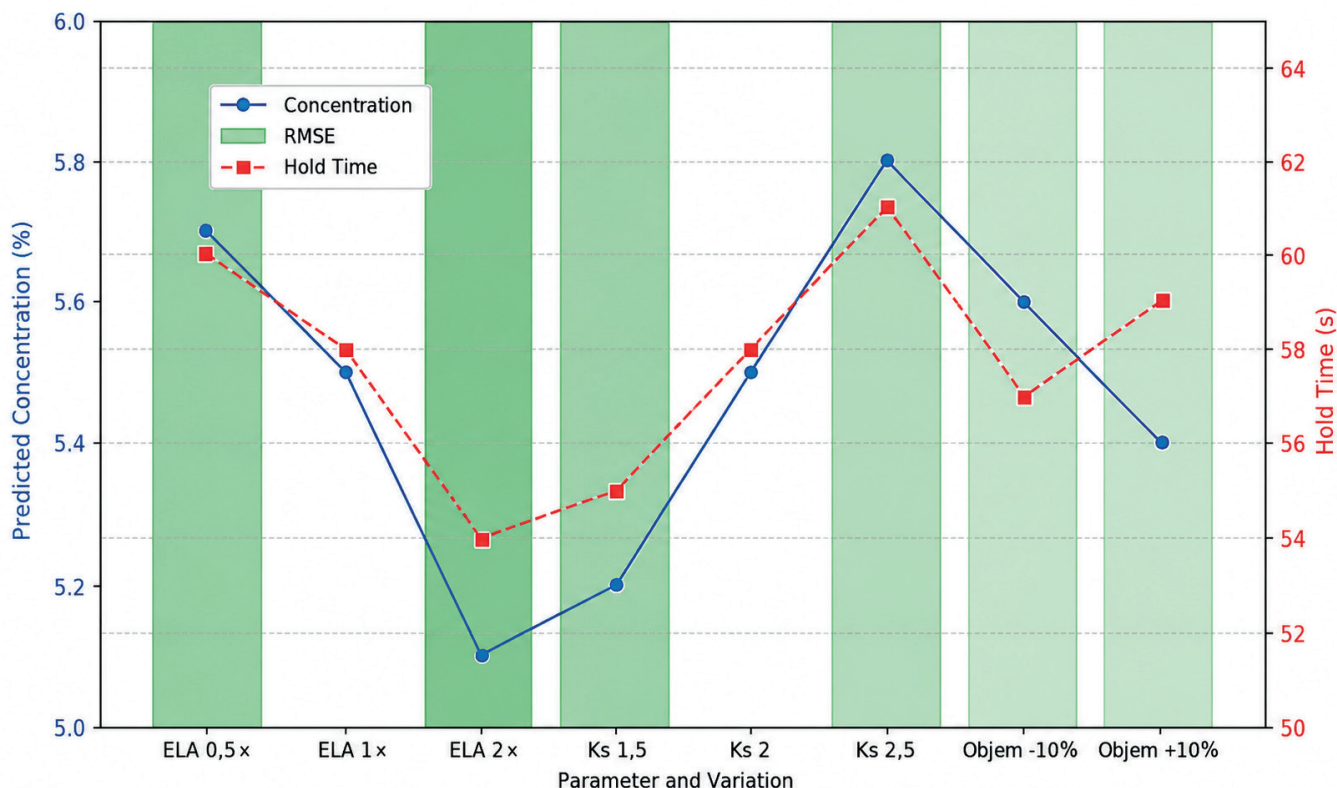


Fig. 8. Sensitivity analysis graph

Rys. 8. Wykres analizy wrażliwości

pomieszczenia. W przypadku systemów takich jak Novec 1230 kluczowe znaczenie miało osiągnięcie pożądanego stężenia i utrzymanie go przez wystarczająco długi czas. Jeżeli ELA było większe, to więcej gazu uciekało i obserwowano krótszy czas retencji oraz niższe stężenie środka. Jeżeli ELA było mniejsze, to lepsza była szczelność pomieszczenia i gaz był dłużej utrzymywany w przestrzeni.

Niniejsze badanie przyczyniło się do rozwoju zrównoważonej inżynierii przeciwpożarowej poprzez zaprojektowanie i weryfikację lokalnego, stacjonarnego systemu gaszenia pożarów przeznaczonego do szaf serwerowych. Proponowany lokalny stacjonarny system gaśniczy na gaz przeznaczony do szaf serwerowych nadawał się do szaf zamkniętych, które są zazwyczaj stosowane w serwerowniach (o powierzchni do ok. 50 m²). Z punktu widzenia zrównoważonego rozwoju środowiskowego wybór FK-5-1-12 (Novec 1230) stanowił proaktywną odpowiedź na obecne i przyszłe polityki klimatyczne Unii Europejskiej, w szczególności rozporządzenie (UE) 2024/573. Z perspektywy ekonomicznej i operacyjnej zrównoważonego rozwoju wyniki sugerują, że systemy ochrony przeciwpożarowej dotyczące szaf mogą obniżyć koszty cyklu życia, ograniczając rozmiar szkód pożarowych, skracając czas przestoju oraz zapobiegając awariom systemów na dużą skalę.

Wnioski

Największe ryzyka to pożar oraz niewystarczająca szczelność szaf z systemem gaśniczym, co może prowadzić do

more from the reference concentration (the model was less accurate), and (ii) parameters with low RMSE (ELA 1 x, Ks 2) correspond exactly to the reference value (they were the optimal values). The system was most sensitive to changes in Ks coefficient, ELA size, and volume of the protected room. For systems like Novec 1230, the key was to achieve the desired concentration and maintain it for a sufficient time. If ELA was larger → more gas leaked → shorter retention time and lower concentration were observed. If ELA was smaller → better sealed room → gas is retained longer.

This study contributed to sustainable fire engineering by designing and validating a localized fixed fire suppression system for server cabinets. The proposed local fixed gas fire extinguishing system in racks was suitable for closed racks, which are typically used in server rooms (up to approximately 50 m²). From an environmental sustainability perspective, the choice of FK-5-1-12 (Novec 1230) represented a proactive response to current and future European climate policy, in particular Regulation (EU) 2024/573. From an economic and operational sustainability perspective, the results suggest that cabinet-level fire protection systems can reduce life cycle costs by limiting the extent of fire damage, reducing downtime and preventing large-scale system outages.

Conclusions

The highest risks are fire and insufficient tightness of fire extinguisher cabinets, which can cause critical damage. Economic and operational losses are directly

poważnych, krytycznych uszkodzeń. Straty ekonomiczne i operacyjne są bezpośrednio proporcjonalne do zdolności systemu do skutecznego i terminowego wykrywania oraz interwencji w przypadku pożaru. Ilość środka gaśniczego została określona na podstawie normy EN 15004-11. Opracowano projekt lokalnego systemu gaszenia pożaru poprzez integrację standardowych obliczeń inżynierskich, symulacji CFD oraz analizy wrażliwości. Metodologia umożliwia weryfikację minimalnych skutecznych stężeń środka Novec 1230 w strefach krytycznych w różnych scenariuszach uwolnienia, zapewniając niezawodną ochronę zasobów o wysokiej wartości. Zintegrowane podejście CFD i analizy wrażliwości łączy modelowanie dynamiki płynów z ilościową oceną kluczowych parametrów (powierzchnia nieszczelności, współczynnik bezpieczeństwa, objętość obudowy), umożliwiając prognozowanie stężenia i czasu jego utrzymania. Weryfikacja oparta na ryzyku wykorzystuje ocenę RMSE do identyfikacji konfiguracji, w których efektywne stężenie substancji może spaść poniżej progowych wartości projektowych, co pozwala ukierunkować zarówno projektowanie, jak i bezpieczeństwo eksploatacyjne.

Podziękowania

Badanie zostało sfinansowane w ramach projektów VEGA 1/0728/24 oraz NFP401101B855.

proportional to the system's ability to detect and intervene effectively in the event of a fire in good time. The amount of extinguishing agent was determined based on the EN 15004-11 standard. This study develops a local fire suppression system design by integrating standard engineering calculations, CFD simulations, and sensitivity analysis. The methodology allows for validation of minimum effective concentrations of Novec 1230 in critical zones under various release scenarios, ensuring reliable protection of high-value assets. Integrated CFD-Sensitivity Approach: combines fluid dynamics modeling with quantitative evaluation of key parameters (leakage area, safety factor, enclosure volume) to predict concentration and retention time. Risk-based verification uses RMSE-based evaluation to identify configurations where the effective concentration of a substance could fall below design thresholds, thereby guiding both design and operational safety.

Acknowledgments

This study was supported from the projects VEGA 1/0728/24 and NFP401101B855.

Abbreviations/Skróty:

NFPA – National Fire Protection Association/Amerykańskie Stowarzyszenie Ochrony Przeciwpożarowej
CFD – *computational fluid dynamics*/obliczeniowa mechanika płynów
BIM – *building information modeling*/modelowanie informacji o budynku
FDS – *fire dynamics simulator*/symulator dynamiki pożaru
ELA – *equivalent leakage area*/równoważna powierzchnia nieszczelności

GWP – *global warming potential*/potencjał tworzenia efektu cieplarnianego
NOAEL – *no observed adverse effect level*/poziom braku obserwowanych działań niepożądanych
RMSE – *root mean square error*/pierwiastek błędu średniokwadratowego
CPU – *central processing unit*/jednostka centralna przetwarzania
GPU – *graphics processing unit*/procesor graficzny

Received/Otrzymano: 19-06-2026

Accepted/Zaaceptowano: 29-06-2026

Reviewed/Zrecenzowano: 22-06-2026

Published/Opublikowano: 17-07-2026

REFERENCES/LITERATURA

- [1] J. Zhang, C. Li, G. Su, W. Mi, *Fire* 2025, **8**, 412, doi.org/10.3390/fire8110412.
- [2] U.S. Fire Administration, Fire and fire loss data from NFIRS 2023; <https://www.usfa.fema.gov/statistics/data-sets>.
- [3] G. Li, J. Guo, Y. Kang, Q. Huang, J. Zhao, C. Liu, *Fire* 2025, **8**, 154, doi.org/10.3390/fire8040154.
- [4] K. Sasakura, T. Aoki, M. Komatsu, T. Watanabe, *Energies* 2020, **13**, 4300, doi.org/10.3390/en13174300.
- [5] S.S. Donohue, M. Suski, C. Chen, [in:] *Data Center Handbook* (H. Geng Ed.), 2021, doi.org/10.1002/9781119597537.ch28.
- [6] C.S. Leong, S.H. Lau, H.H. Liew, *Eng. Proc.* 2025, **91**, 11, doi.org/10.3390/engproc2025091011.
- [7] V. Loboichenko, G. Wilk-Jakubowski, L. Pawlik, J.L. Wilk-Jakubowski, R. Shevchenko, O. Shevchenko, R. Harabin, A. Kuchcinski, V. Fedorchuk-Moroz, A. Khmyrova et al., *Sensors* 2025, **25**, 6399, doi.org/10.3390/s25206399.
- [8] ISO 6183:2022, *Fire protection equipment. Carbon dioxide extinguishing systems for use on premises. Design and installation*; <https://www.iso.org/standard/74513.html>.
- [9] STN EN 15004-11, *Stabilné hasiace zariadenia. Plynové hasiace zariadenia. Časť 11. Fyzikálne vlastnosti a návrh systémov plynových hasiacich systémov pre hasiacu látku Halocarbon Blend 55 (mod ISO 14520-17:2022)*; www.sutn.sk.
- [10] EN 12094-1:2003, *Fixed firefighting systems. Components for gas extinguishing systems. Part 1. Requirements and test methods for electrical automatic control and delay devices*, www.sutn.sk.
- [11] Act No. 314/2001, Coll. on fire protection; www.slov-lex.sk.
- [12] ISO 14520-10:2019-ed.4.0, *Gaseous fire-extinguishing systems. Physical properties and system design. Part 10. HFC 23*; <https://eshop.normservis.sk/norma/iso-14520-10-2019-2.7.2019.html>.
- [13] STN 92 0201-4, *Structural fire protection. Common regulations. Part 4. Structural intervals*; www.sutn.sk.
- [14] NFPA 76, *Standard for the fire protection of telecommunications facilities*, 2024; <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-76-standard-development/76>.