

Automatyczne działko wodno-pianowe w instalacjach przeciwpożarowych – badania hydrauliczne i weryfikacja działania systemu

Automatic water-foam monitor for fire protection systems: hydraulic investigations and system performance verification

Michał Zielina^{1*} , Bartosz Kopiczak² , Michał Bubka³, Anita Siwek³

¹ Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Krakowska

² Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska

³ ASPROJEKT Kraków

* Kontakt / Correspondence: michal.zielina@pk.edu.pl

Streszczenie:

W artykule przedstawiono wyniki badań automatycznego działka wodno-pianowego przeznaczonego do zastosowań w instalacjach przeciwpożarowych obiektów przemysłowych i magazynowych. Badane urządzenie stanowi element opracowanego przez autorów systemu gaśniczego integrującego działko wodno-pianowe, układ automatycznego sterowania oraz system detekcji termowizyjnej. Szczególną uwagę poświęcono analizie charakterystyki hydraulicznej urządzenia oraz ocenie jego działania w warunkach rzeczywistych. Zakres badań obejmował pomiary hydrauliczne, badania poligonowe oraz analizy numeryczne CFD. Wyznaczono zależności pomiędzy parametrami pracy działka a zasięgiem strumienia środka gaśniczego, określono charakterystykę strat ciśnienia oraz zweryfikowano warunki przepływu wewnątrz układu hydraulicznego. Wyniki analiz numerycznych potwierdziły brak zjawiska kawitacji w analizowanym zakresie parametrów pracy. Przeprowadzone badania wykazały możliwość uzyskania zasięgu strumienia dochodzącego do około 100 m przy ciśnieniu roboczym 12 bar i wydajności około 3700 l/min. Największy zasięg uzyskiwano dla kąta nachylenia działka wynoszącego około 30°. Badania na stanowisku ogniowym potwierdziły skuteczność działania systemu automatycznej detekcji i naprowadzania strumienia środka gaśniczego. Uzyskane wyniki wskazują, że opracowane rozwiązanie może stanowić skuteczne uzupełnienie klasycznych stałych urządzeń gaśniczych w obiektach wielkopowierzchniowych, wymagających dużego zasięgu działania oraz szybkiej reakcji na rozwijające się zagrożenia pożarowe.

Słowa kluczowe: działko wodno-pianowe, instalacje przeciwpożarowe, charakterystyka hydrauliczna, termowizja, CFD, automatyczne systemy gaśnicze

Abstract:

This paper presents the results of research and development work on an automatic water-foam monitor designed for fire protection systems used in industrial and warehouse facilities. The investigated device is a component of an innovative firefighting system developed by the authors, integrating an automatic water-foam monitor, a dedicated control system, and a thermal imaging-based fire detection system. Attention was paid to the hydraulic characteristics of the device and its integration with existing water supply systems. The research program included hydraulic measurements, numerical CFD analyses, and full-scale experimental tests carried out under laboratory and field conditions. Relationships between operating parameters and the range of the extinguishing stream were determined, pressure loss characteristics were established, and flow conditions inside the hydraulic system were evaluated. The CFD analyses confirmed the absence of cavitation within the investigated operating range and allowed verification of the experimentally obtained results. The results showed that the monitor could achieve an extinguishing stream range of approximately 100 m at an operating pressure of 12 bar and a flow rate of about 3700 L/min. The maximum range was obtained for a monitor elevation angle of approximately 30°. Full-scale fire tests confirmed the effectiveness of the automatic fire detection and stream positioning functions developed by the authors. The obtained results indicate that the proposed solution can be used as an effective supplement or alternative to conventional fixed firefighting systems in large industrial facilities requiring long-range operation and rapid response to developing fire hazards.

Keywords: water-foam monitor, fire protection systems, hydraulic characteristics, thermal imaging, CFD, automatic firefighting systems, fire detection, industrial facilities

1. Wprowadzenie

Systemy ochrony przeciwpożarowej oparte na instalacjach wodnych stanowią podstawowy element zabezpieczenia współczesnych obiektów przemysłowych i magazynowych. Najczęściej stosowane rozwiązania obejmują instalacje tryskaczowe projektowane zgodnie z normami NFPA 13 oraz EN 12845, które określają wymagania dotyczące projektowania, instalacji i eksploatacji systemów gaśniczych [3, 8]. Systemy te cechują się wysoką skutecznością w ograniczaniu rozwoju pożaru, jednak ich efektywność zależy od warunków instalacyjnych, właściwego rozmieszczenia urządzeń oraz charakterystyki chronionego obiektu.

W literaturze wskazuje się, że w przypadku obiektów o dużej kubaturze, takich jak hale przemysłowe i magazyny wysokiego składowania, klasyczne systemy stałe mogą wykazywać ograniczoną skuteczność wynikającą z opóźnionej detekcji pożaru oraz utrudnionej dystrybucji środka gaśniczego [1, 6, 7]. Problemy te wynikają m.in. z oddziaływania strumieni konwekcyjnych gorących gazów, ograniczonej penetracji strumienia wodnego oraz nierównomiernego rozkładu kropli w przestrzeni.

Jednym z kierunków rozwoju systemów gaśniczych są rozwiązania wykorzystujące rozpylone strumienie wody oraz mgłę wodną (water mist). Badania wykazały, że skuteczność gaszenia zależy od parametrów fizycznych strumienia, takich jak średnica kropli, intensywność przepływu oraz charakterystyka oddziaływania z płomieniem [6]. Systemy mgły wodnej umożliwiają efektywne chłodzenie strefy spalania i ograniczenie promieniowania ciepłego przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia wody [5, 11]. Współcześnie technologia ta znajduje szerokie zastosowanie w instalacjach przemysłowych i specjalnych systemach gaśniczych.

Alternatywnym podejściem są systemy wykorzystujące działka wodne i wodnopianowe, które umożliwiają kierunkowe podawanie dużych ilości środka gaśniczego na znaczne odległości. Rozwiązania te są szczególnie przydatne w obiektach o dużej kubaturze oraz w przestrzeniach otwartych, gdzie wymagane jest szybkie i selektywne oddziaływanie na ognisko pożaru [2, 13]. Badania eksperymentalne wskazują, że automatyczne działka wodne mogą charakteryzować się krótszym czasem reakcji i skuteczniejszym tłumieniem pożaru w porównaniu do klasycznych systemów tryskaczowych w określonych warunkach [13].

Istotnym zagadnieniem związanym z eksploatacją tego typu urządzeń jest charakterystyka hydrauliczna strumienia oraz jego trajektoria. Badania wykazały, że zasięg i skuteczność działania zależą od takich parametrów jak ciśnienie robocze, kąt nachylenia, prędkość początkowa strumienia oraz warunki środowiskowe, w tym wpływ wiatru [4, 9]. W analizie tych zjawisk coraz częściej wykorzystywane są metody numeryczne (CFD), umożliwiające modelowanie przepływu oraz optymalizację parametrów pracy systemów gaśniczych [14].

Istotnym kierunkiem rozwoju współczesnych systemów przeciwpożarowych jest integracja urządzeń gaśniczych z nowoczesnymi metodami detekcji. W szczególności zastosowanie technik termowizyjnych umożliwia szybkie wykrycie źródła pożaru i jego lokalizację w czasie rzeczywistym [12]. Rozwiązania te znajdują zastosowanie w systemach automatycznych oraz au-

tonomicznych, w których detekcja i gaszenie pożaru odbywa się bez udziału operatora, co znacząco skraca czas reakcji i zwiększa skuteczność działania [10].

Pomimo rosnącej liczby badań dotyczących systemów wykorzystujących mgłę wodną oraz działka przeciwpożarowe, stosunkowo niewiele publikacji poświęconych jest kompleksowej analizie zintegrowanych systemów automatycznych działek wodnopianowych, w szczególności w kontekście ich charakterystyki hydraulicznej oraz współpracy z instalacjami zasilającymi. Z punktu widzenia praktyki projektowej istotne jest określenie zależności pomiędzy parametrami instalacji wodnej a efektywnością działania urządzenia.

Celem pracy było określenie charakterystyki hydraulicznej automatycznego działka wodno-pianowego oraz ocena jego skuteczności działania w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych. W ramach badań analizowano wpływ parametrów zasilania na zasięg strumienia środka gaśniczego, a także oceniono działanie opracowanego przez autorów systemu automatycznego naprowadzania działka wykorzystującego detekcję termowizyjną.

Badania przeprowadzono na dwóch niezależnych poligonach badawczych. Pierwszy z nich przeznaczony był do badań hydraulicznych i wyznaczenia charakterystyki strumienia środka gaśniczego. Drugi poligon wykorzystano do badań działania kompletnego systemu gaśniczego obejmującego działko wodno-pianowe, system detekcji termowizyjnej oraz układ automatycznego sterowania.

2. Materiały i metody

2.1. Charakterystyka badanego urządzenia

Przedmiotem badań było automatyczne działko wodno-pianowe przeznaczone do zastosowań w instalacjach przeciwpożarowych obiektów przemysłowych i magazynowych. Urządzenie umożliwia kierunkowe podawanie strumienia środka gaśniczego na znaczne odległości oraz pracę w trybie ręcznym, półautomatycznym i automatycznym. Na rys. 1 przedstawiono badane działko wodnopianowe w pomieszczeniu zamkniętym i na stanowisku poligonowym.



Rys. 1. Badane działko wodno-pianowe w pomieszczeniu zamkniętym (po lewej) oraz na stanowisku poligonowym (po prawej)
Źródło: opracowanie własne

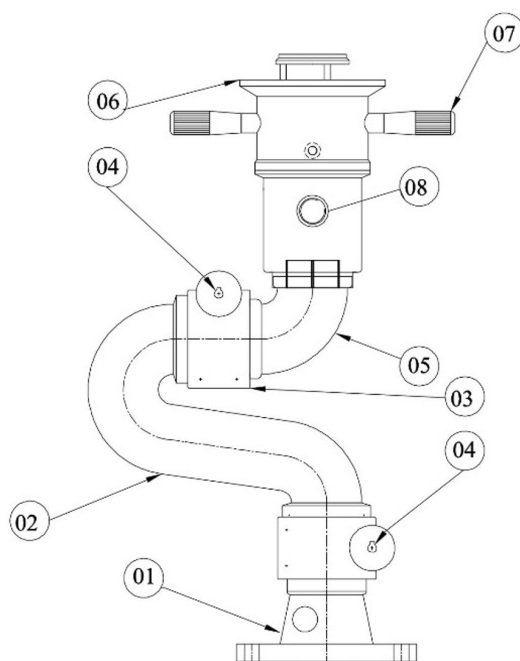
Fig. 1. Tested water-foam monitor in an indoor facility (left) and at the outdoor test range (right). Source: authors' own study

Istotnym elementem opracowanego rozwiązania jest możliwość współpracy z systemem detekcji opartym na analizie obrazu termicznego. Opracowany system umożliwiał identyfikację źródła podwyższonej temperatury przy pomocy zestawu kamer termowizyjnych Optris Xi 410, a następnie generował sygnały sterujące dla układu napędowego działka, co pozwalało na automatyczne naprowadzanie strumienia środka gaśniczego na obszar zagrożenia.

Działko składało się z podstawowych zespołów funkcjonalnych, do których należały:

- układ hydrauliczny obejmujący korpus, przewody doprowadzające oraz głowicę zakończoną dyszą,
- układ mechaniczny odpowiedzialny za zmianę położenia strumienicy w płaszczyźnie poziomej i pionowej,
- układ napędowy realizowany za pomocą siłowników elektrycznych,
- układ sterowania umożliwiający realizację procesu naprowadzania strumienia.

Układ hydrauliczny zaprojektowano w sposób zapewniający minimalizację strat ciśnienia przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej charakterystyki strumienia. Kluczowym elementem jest dysza, której geometria wpływa na kształt strugi, stopień rozdrobnienia kropli oraz efektywność transportu środka gaśniczego. Schemat konstrukcyjny urządzenia przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat konstrukcyjny działka wodnopianowego (1 – kołnierz z redukcją symetryczną, 2 – kolano długie, 3 – wewnętrzne łożyska, 4 – trzpień do podłączenia sterowania, 5 – kolano 90°, 6 – dysza, 7 – uchwyt do dyszy, 8 – wejście do węża na pianę). Źródło: opracowanie własne

Fig. 2. Structural layout of the water-foam monitor (1 – flange with concentric reducer, 2 – long-radius elbow, 3 – internal bearings, 4 – control linkage shaft, 5 – 90° elbow, 6 – nozzle, 7 – nozzle mounting bracket, 8 – foam hose connection). Source: authors' own study

Podstawowe parametry techniczne badanego urządzenia obejmowały: zakres ciśnienia roboczego od około 8 do 12 bar, maksymalną wydajność dochodzącą do około 3700 l/min, maksymalny zasięg strumienia wynoszący około 100 m, zakres ruchu w płaszczyźnie poziomej rzędu 140°, zakres ruchu w płaszczyźnie pionowej od około -40° do +60°.

Parametry te odpowiadają wymaganiom stawianym urządzeniom stosowanym w ochronie obiektów wielkokubaturowych, w których istotne znaczenie ma duży zasięg działania oraz wysoka intensywność podawania środka gaśniczego. W konstrukcji działka zastosowano rozwiązania umożliwiające jego integrację z instalacją wodociagową przeciwpożarową. Urządzenie może być zasilane z różnych źródeł, takich jak sieć hydrantowa, pompownie przeciwpożarowe oraz zbiorniki retencyjne wyposażone w układy pompowe.

2.2. Metodyka badań hydraulicznych

Badania hydrauliczne przeprowadzono na stanowisku umożliwiającym regulację parametrów zasilania oraz pomiar zasięgu strumienia środka gaśniczego. Stanowisko obejmowało działko wodno-pianowe, przenośny agregat pompowy Rosenbauer SPA100, samochód pożarniczy 515[K]25 wyposażony w system sterowania Logic Control System (LCS) oraz wbudowany przepływomierz elektromagnetyczny o niepewności pomiaru $\pm 1\%$, układ przewodów zasilających, przepływomierz kryzowy FO Turbo-Lux 3 oraz zamontowany przed działkiem manometr wypełniony gliceryną o zakresie 0–15 bar i klasie dokładności 2,5, co odpowiada niepewności pomiaru wynoszącej $\pm 37,5$ kPa. Samochód pożarniczy 515[K]25 pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Wykorzystany podczas badań samochód pożarniczy 515[K]25. Źródło: opracowanie własne

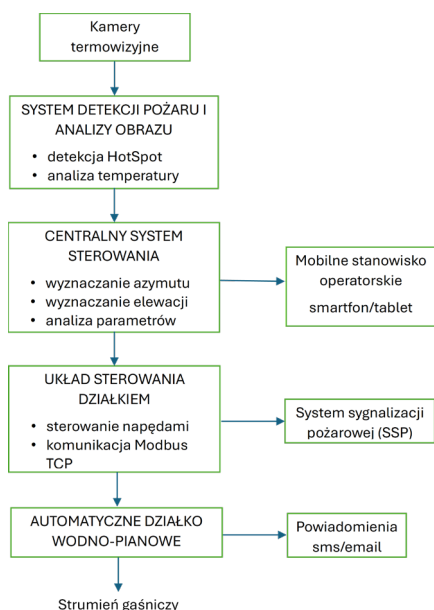
Fig. 3. Firefighting vehicle Rosenbauer 515[K]25 used in the experimental investigation. Source: authors' own study

Badane działko zamocowano do wózka widłowego, co umożliwiło stabilizację urządzenia i zmianę jego wysokości względem terenu. Woda transportowana była do działka za pomocą przewodów pożarniczych poprzez układ pomiarowy umożliwiający kontrolę parametrów pracy. Pole pomiarowe miało długość około 120 m i zostało podzielone na sektory pomiarowe rozmieszczone co 5 m. Pomiary wykonano dla różnych wartości ciśnienia roboczego, natężenia przepływu oraz kąta nachylenia strumienicy. W trakcie badań zmieniano: ciśnienie robocze, natężenie przepływu, kąt nachylenia strumienicy. Dla każdej konfiguracji parametrów określano zasięg strumienia oraz położenie jego centralnej części względem wyznaczonego pola pomiarowego.

2.3. Metodyka badań na stanowisku ogniowym

Badania na stanowisku ogniowym przeprowadzono w celu oceny funkcjonowania opracowanego przez autorów systemu gaśniczego obejmującego działko wodnopianowe, układ automatycznego sterowania oraz system detekcji termowizyjnej. Celem badań była ocena skuteczności wykrywania zagrożenia, czasu reakcji systemu, dokładności naprowadzania strumienia środka gaśniczego oraz skuteczności procesu gaszenia. Stanowisko badawcze składało się z działka wodnopianowego, układu zasilania wodą, zespołu sterowania, kamer termowizyjnych oraz stanowiska ogniowego stanowiącego źródło kontrolowanego pożaru.

W badaniach wykorzystano kamerę termowizyjną Optris Xi410 wyposażoną w detekcję najcieplejszego punktu obserwowanego obszaru. Kamera pracowała w zakresie pomiarowym od -20°C do 900°C i rejestrowała obraz termiczny o rozdzielczości 384×240 pikseli. Komunikacja z systemem sterowania realizowana była za pośrednictwem sieci Ethernet. Obraz termiczny poddawano analizie w czasie rzeczywistym w celu identyfikacji źródła ciepła oraz określenia jego położenia względem działka. Strukturę systemu detekcji zastosowaną w opracowanym prototypie przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Struktura opracowanego systemu automatycznego gaszenia pożaru. Źródło: opracowanie własne

Fig. 4. Architecture of the developed automatic fire suppression system. Source: authors' own study

Sterowanie działkiem realizowano za pomocą opracowanego przez autorów systemu automatyki wykorzystującego napędy elektryczne oraz enkodery położenia. Układ sterowania wyznaczał wymagany azymut oraz kąt elewacji strumienicy na podstawie współrzędnych źródła ciepła określonych przez system termowizyjny. Komunikacja pomiędzy urządzeniami realizowana była w oparciu o przemysłowy protokół Modbus TCP. Badania prowadzono w trybie półautomatycznym oraz automatycznym. W trybie półautomatycznym operator zatwierdzał rozpoczęcie procesu gaszenia po wykryciu zagrożenia. W trybie automatycznym po przekroczeniu zadanej temperatury progowej następowało automatyczne ustawienie działka i uruchomienie podawania środka gaśniczego. W trakcie prób rejestrowano: czas reakcji systemu od momentu wykrycia źródła ciepła; czas ustawienia działka w zadanej pozycji; dokładność naprowadzania strumienia względem stanowiska ogniowego oraz czas prowadzenia procesu gaszenia. Przyjęta metodyka umożliwiła ocenę współpracy systemu detekcji termowizyjnej, układu sterowania oraz działka wodnopianowego w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków eksploatacji.

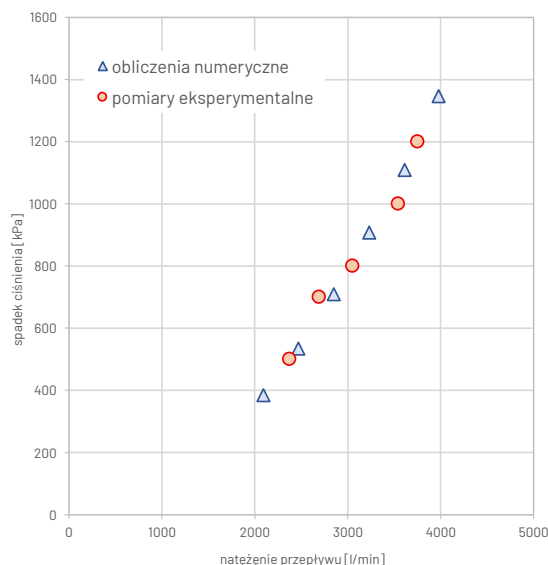
2.4. Metody analizy hydraulicznej i numerycznej

Analiza hydrauliczna obejmowała ocenę wpływu parametrów eksploatacyjnych na zasięg oraz charakterystykę strumienia środka gaśniczego. Analizowano zależności pomiędzy ciśnieniem roboczym, natężeniem przepływu i kątem nachylenia strumienicy a uzyskiwanym zasięgiem strugi. Uzupełnieniem badań eksperymentalnych była analiza numeryczna przepływu wykonana metodą CFD (Computational Fluid Dynamics). Model numeryczny odwzorowywał geometrię układu hydraulicznego działka i umożliwiał analizę rozkładu ciśnienia oraz prędkości przepływu wewnątrz urządzenia. Analizy numeryczne wykorzystano do: oceny rozkładu prędkości i ciśnienia, identyfikacji potencjalnych obszarów występowania kawitacji, określenia wpływu stopnia otwarcia układu przepływowego na parametry strumienia. Szczegółowy opis modelu numerycznego oraz wyniki obliczeń CFD zostaną przedstawione w odrębnym opracowaniu poświęconym analizie przepływu w układzie hydraulicznym działka wodnopianowego.

3. Wyniki i ich analiza

3.1. Straty ciśnienia w układzie hydraulicznym działka

Pierwszym etapem analizy było określenie strat ciśnienia występujących w układzie hydraulicznym badanego działka wodnopianowego. Pomiary eksperymentalne uzupełniono obliczeniami numerycznymi CFD, co umożliwiło ocenę zgodności obu metod badawczych.



Rys. 5. Zależność strat ciśnienia w działku wodno-pianowym od natężenia przepływu. Porównanie wyników eksperymentalnych i obliczeń CFD. Źródło: opracowanie własne

Fig. 5. Relationship between pressure loss and flow rate in the water-foam monitor. Comparison of experimental measurements and CFD results. Source: authors' own study

Wyniki przedstawione na rys. 5 wykazały nieliniowy wzrost strat ciśnienia wraz ze wzrostem natężenia przepływu. Dla przepływu około 2500 kg/min strata ciśnienia wynosiła około 500 kPa, natomiast dla przepływu około 3000 kg/min osiągała wartości zbliżone do 800 kPa. Przy największych analizowanych przepływach, wynoszących około 3700–4000 kg/min, straty ciśnienia przekraczały 1200 kPa.

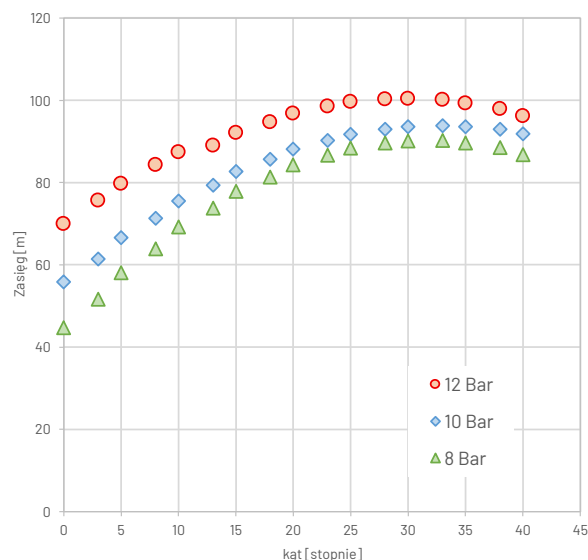
Porównanie wyników eksperymentalnych i obliczeń CFD wskazuje na bardzo dobrą zgodność obu metod. Różnice pomiędzy wartościami obliczonymi i zmierzonymi były niewielkie w całym analizowanym zakresie pracy. Potwierdza to poprawność opracowanego modelu numerycznego oraz możliwość jego wykorzystania do dalszych analiz przepływu wewnątrz badanego urządzenia.

Z praktycznego punktu widzenia uzyskana charakterystyka jest istotna podczas doboru pomp zasilających oraz projektowania instalacji współpracujących z działkiem wodno-pianowym, gdyż pozwala określić wymagane parametry hydrauliczne całego systemu. Opracowana charakterystyka została również wykorzystana w algorytmach sterowania działkiem, umożliwiając automatyczną regulację stopnia otwarcia przepustnicy w zależności od wymaganej odległości podawania środka gaśniczego i aktualnych parametrów pracy układu.

4. Charakterystyka hydrauliczna badanego działka

W wyniku przeprowadzonych badań laboratoryjnych określono zależności pomiędzy parametrami pracy działka wodno-pianowego a zasięgiem strumienia środka gaśniczego. Analizie poddano wpływ ciśnienia roboczego, natężenia przepływu oraz kąta nachylenia strumienicy. W badanym zakresie parametrów stwierdzono, że wzrost ciśnienia roboczego powoduje zwiększenie

zasięgu strumienia. Dla najwyższych wartości ciśnienia uzyskiwano największe odległości rzutu, co przekłada się bezpośrednio na zwiększenie efektywnego zasięgu działania urządzenia.



Rys. 6. Zasięg rzutu środka gaśniczego w funkcji kąta nachylenia armatki dla różnych wartości ciśnienia. Źródło: opracowanie własne

Fig. 6. Extinguishing agent stream range as a function of monitor elevation angle for different operating pressures. Source: authors' own study

Przedstawione na rys. 6 wyniki badań eksperymentalnych wykazały również istotny wpływ kąta nachylenia strumienicy na zasięg działania działka. Maksymalne wartości zasięgu uzyskiwano dla kątów z przedziału 30°–33°, natomiast dla wartości większych i mniejszych obserwowano skrócenie efektywnego zasięgu strumienia. Wzrost natężenia przepływu powodował zwiększenie zwartości strugi oraz poprawę jej stabilności, co sprzyjało osiągnięciu większych zasięgów działania działka.

4.1. Analizy numeryczne CFD (Computer Fluid Dynamic)

Uzupełnieniem badań eksperymentalnych były analizy numeryczne CFD przeprowadzone dla badanego układu hydraulicznego. Ich celem była ocena warunków przepływu oraz identyfikacja zjawisk, które nie mogą być bezpośrednio obserwowane podczas pomiarów eksperymentalnych. Przeprowadzone obliczenia umożliwiły określenie rozkładów prędkości i ciśnienia wewnątrz układu przepływowego. Szczególną uwagę zwrócono na obszary o dużych zmianach kierunku przepływu oraz lokalnych przyspieszeniach strugi. Analizy wykazały brak obszarów, w których ciśnienie spadałoby poniżej ciśnienia parowania cieczy. Oznacza to, że w analizowanym zakresie parametrów pracy nie występowały warunki sprzyjające powstawaniu kawitacji. Wynik ten potwierdza poprawność przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych oraz możliwość bezpiecznej eksploatacji działka przy dużych wydajnościach przepływu. Dodatkowo obliczenia numeryczne umożliwiły określenie zakresu stopnia otwarcia układu przepływowego zapewniającego maksymalny zasięg strumienia. Uży-

skane wyniki pozostawały zgodne z obserwacjami wykonanymi podczas badań eksperymentalnych. Szczegółowe wyniki analiz CFD zostaną przedstawione w odrębnym opracowaniu poświęconym modelowaniu przepływu w działku wodno-pianowym.

4.2. Wyniki badań na stanowisku ogniowym

Badania prowadzone na stanowisku ogniowym miały na celu ocenę współpracy działka wodno-pianowego, systemu detekcji termowizyjnej oraz układu automatycznego sterowania. W trakcie badań system termowizyjny poprawnie identyfikował źródła ciepła znajdujące się w obszarze obserwacji. Po wykryciu zagrożenia następowało wyznaczenie współrzędnych pożaru oraz przekazanie danych do systemu sterowania działkiem.



Rys. 7. Stanowisko ogniowe wykorzystane do oceny działania automatycznego systemu gaśniczego. Źródło: opracowanie własne
Fig. 7. Fire test stand used during the evaluation of the automatic fire suppression system. Source: authors' own study

Opracowany przez autorów system automatycznie wyznaczał wymagane wartości azymutu i elewacji, a następnie ustawiał działko w kierunku źródła zagrożenia. W kolejnej fazie uruchamiane było podawanie środka gaśniczego pod odpowiednim ciśnieniem. Zarejestrowane czasy reakcji systemu mieściły się w przedziale od 1 do 2 s, natomiast czas ustawienia działka w zadanej pozycji wynosił około 9 s. Uzyskane wartości wskazują na wysoką dynamikę działania systemu. Dokładność kierowania strumienia środka gaśniczego względem celu wynosiła 0,5 m. W trakcie prób potwierdzono możliwość skutecznego podania środka gaśniczego bezpośrednio na obszar objęty pożarem. Podczas wszystkich przeprowadzonych prób potwierdzono poprawną współpracę systemu detekcji, układu sterowania oraz działka wodno-pianowego.

8.1. Ocena skuteczności opracowanego systemu

W wyniku przeprowadzonych badań określono podstawowe parametry eksploatacyjne opracowanego systemu gaśniczego. Zarejestrowane czasy reakcji systemu mieściły się w przedziale od 1 do 2 s. Czas ustawienia działka w zadanej pozycji wynosił około 9 s. Otrzymane wyniki wskazują na możliwość szybkiego reagowania na pojawiające się zagrożenia pożarowe. Dokładność naprowadzania strumienia względem stanowiska ogniowego wynosiła około 0,5 m. Uzyskana wartość okazała się wystarczająca do skutecznego skierowania środka gaśniczego na źródło pożaru. Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość uży-

skania zasięgu strumienia rzędu 100 m, co pozwala na wykorzystanie urządzenia do ochrony obiektów wielkopowierzchniowych, takich jak hale magazynowe, place składowe oraz zakłady przemysłowe.

4.3. Dyskusja wyników

Uzyskane wyniki badań wskazują, że opracowany przez autorów system gaśniczy, integrujący działko wodno-pianowe, układ napędowy, system sterowania oraz detekcję termowizyjną, spełnia wymagania stawiane nowoczesnym instalacjom przeciwpożarowym.

Szczególnie istotne są wyniki analiz hydraulicznych, które wykazały możliwość uzyskania dużych zasięgów strumienia przy zachowaniu stabilnej pracy urządzenia. Potwierdzono również wysoką zgodność wyników eksperymentalnych oraz obliczeń CFD, co zwiększa wiarygodność opracowanego modelu numerycznego i umożliwia jego wykorzystanie do dalszych analiz przepływu w układzie hydraulicznym działka.

Analiza wyników badań hydraulicznych wykazała, że największy zasięg strumienia uzyskiwany jest dla kąta nachylenia działka wynoszącego około 30°. Wynik ten pozostaje zgodny z obserwacjami prezentowanymi w literaturze dla *działek wodno-pianowych*, dla których maksymalny zasięg strumienia osiągnięty jest zazwyczaj przy kątach mniejszych od 45° [4, 9].

Należy zauważyć, że w klasycznym modelu rzutu ukośnego punktu materialnego, przy pominięciu oporów ruchu, maksymalny zasięg osiągnięty jest dla kąta 45°. W przypadku rzeczywistej strugi wodnej warunek ten nie jest jednak spełniony. Na tor lotu strugi wpływają między innymi opory aerodynamiczne, turbulencje, rozpad strumienia na krople, geometria dyszy oraz warunki atmosferyczne. W rezultacie największy zasięg działania działka uzyskiwany jest przy kątach mniejszych od wartości teoretycznej [4, 9].

Istotnym wynikiem badań była również ocena warunków przepływu wewnątrz układu hydraulicznego. Przeprowadzone analizy CFD nie wykazały występowania obszarów, w których mogłoby dojść do inicjacji zjawiska kawitacji. Oznacza to, że konstrukcja układu hydraulicznego zapewnia odpowiednie warunki przepływu nawet przy dużych wydajnościach przekraczających 3500 kg/min.

Dodatkową korzyścią wynikającą z analiz hydraulicznych było opracowanie charakterystyki zależności strat ciśnienia od natężenia przepływu. Charakterystyka ta ma znaczenie nie tylko podczas doboru pomp i projektowania instalacji współpracujących z działkiem wodno-pianowym, lecz została również wykorzystana w opracowanym przez autorów systemie sterowania. Umożliwia ona automatyczną regulację stopnia otwarcia przepustnicy w zależności od wymaganej odległości podawania środka gaśniczego oraz aktualnych parametrów pracy układu.

Przeprowadzone badania ogniowe potwierdziły skuteczność działania systemu automatycznej detekcji oraz naprowadzania strumienia. Uzyskane czasy reakcji i dokładność pozycjonowania wskazują na możliwość zastosowania rozwiązania w systemach ochrony przeciwpożarowej obiektów przemysłowych i magazynowych, w których wymagany jest duży zasięg działania oraz szybka reakcja na pojawiające się zagrożenia pożarowe.

9. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań hydraulicznych, badań na stanowisku ogniowym oraz analiz numerycznych CFD sformułowano następujące wnioski:

9. Badane działko wodno-pianowe umożliwia skuteczne podawanie środka gaśniczego na odległość dochodzącą do około 100 m, co pozwala na jego wykorzystanie w ochronie obiektów wielkopowierzchniowych.
10. Wraz ze wzrostem ciśnienia roboczego obserwuje się zwiększenie zasięgu strumienia, przy jednoczesnym wzroście strat ciśnienia w układzie hydraulicznym.
11. Największy zasięg strumienia uzyskano dla kąta nachylenia działka wynoszącego około 30°, co jest zgodne z obserwacjami publikowanymi dla działek przeciwpożarowych.
12. Wyznaczona charakterystyka strat ciśnienia w funkcji natężenia przepływu może być wykorzystana zarówno podczas doboru urządzeń zasilających, jak i w algorytmach automatycznej regulacji stopnia otwarcia przepustnicy zastosowanych w opracowanym systemie sterowania.
13. Analizy numeryczne CFD wykazały wysoką zgodność z wynikami badań eksperymentalnych, co potwierdza poprawność opracowanego modelu obliczeniowego
14. W analizowanym zakresie parametrów pracy nie stwierdzono występowania warunków sprzyjających kawitacji, co potwierdza poprawność przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych układu hydraulicznego.
15. Wyniki analiz CFD umożliwiły określenie stopnia otwarcia układu przepływowego zapewniającego maksymalny zasięg strumienia oraz wspomagają optymalizację parametrów pracy urządzenia.
16. Opracowany przez autorów system gaśniczy, integrujący działko wodno-pianowe, system detekcji termowizyjnej oraz układ automatycznego sterowania, zapewnia skuteczne wykrywanie zagrożeń i automatyczne naprowadzanie strumienia środka gaśniczego.
17. Uzyskane czasy reakcji systemu (1–2 s) oraz czas ustawienia działka (ok. 9 s) wskazują na wysoką dynamikę działania układu i możliwość jego zastosowania w systemach wymagających szybkiej reakcji na rozwijające się zagrożenia pożarowe.
18. Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość zastosowania opracowanego rozwiązania w systemach ochrony przeciwpożarowej hal magazynowych, zakładów przemysłowych, placów składowych oraz innych obiektów wymagających dużego zasięgu działania i automatyzacji procesu gaszenia.

10. Literatura

- [1] Drysdale, D. (2011). *An introduction to fire dynamics*. John Wiley & sons.
- [2] Duan, L., & Hou, X. (2021). Review of automatic fire water monitor system. *Journal of Physics Conference Series*, 1894(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1894/1/012013>
- [3] European Committee for Standardization. (2019). EN 12845:2015+A1:2019. Fixed firefighting systems—Automatic sprinkler systems—Design, installation and maintenance
- [4] Fan, Q., Deng, Q., & Liu, Q. (2024). Research and application on modeling and landing point prediction technology for water jet trajectory of fire trucks under large-scale scenarios. *Scientific Reports*, 14(1), 21950. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72476-y>
- [5] Farrell, K., Hassan, M. K., Hossain, M. D., Ahmed, B., Rahnamayezekavat, P., Douglas, G., & Saha, S. (2023). Water mist fire suppression systems for building and industrial applications: Issues and challenges. *Fire*, 6(2), 40. <https://doi.org/10.3390/fire6020040>
- [6] Grant, G., Brenton, J., & Drysdale, D. (2000). Fire suppression by water sprays. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(2), 79–130. [https://doi.org/10.1016/s0360-1285\(99\)00012-x](https://doi.org/10.1016/s0360-1285(99)00012-x)
- [7] Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (2000). *Enclosure fire dynamics*. CRC press.
- [8] NFPA 13. (2022). *Standard for the Installation of Sprinkler Systems*. Quincy, MA: National Fire Protection Association
- [9] Ponziani, F. A., & Tinaburri, A. (2015). Water jet streams modeling for firefighting activities with the aid of CFD. *WIT Transactions on the Built Environment*, 151, 323–334. <https://doi.org/10.2495/SAFE150281>
- [10] Ren, X., Qu, K., Guo, J., Yin, H., & Huang, B. (2025). Research on accurate fire source localization and seconds-level autonomous fire extinguishing technology. *Scientific Reports*, 15(1), 17135. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01830-5>
- [11] Robinet, A., & Chetehouna, K. (2024). A review of additives for water mist fire suppression systems. *Fire Technology*, 60(5), 2923–2961. <https://doi.org/10.1007/s10694-024-01570-4>
- [12] Sousa, M. J., Moutinho, A., & Almeida, M. (2020). Thermal infrared sensing for near Real-Time Data-Driven fire detection and Monitoring systems. *Sensors*, 20(23), 6803. <https://doi.org/10.3390/s20236803>
- [13] Xin, Y., Thummuluru, S., Jiang, F., Yin, R., Yao, B., Zhang, K., & Liu, B. (2013). An experimental study of automatic water cannon systems for fire protection of large open spaces. *Fire Technology*, 50(2), 233–248. <https://doi.org/10.1007/s10694-013-0363-4>
- [14] Zhu, P., Xu, Z., Zhang, J., Shao, Q., Chen, W., & Ai, H. (2024). Numerical study on fire suppression by water mist in aircraft cargo compartments: Effects of spray pattern, droplet size, and nozzle layout. *Fire*, 7(12), 481. <https://doi.org/10.3390/fire7120481>

Podziękowania

Prace badawczo – rozwojowe zostały współfinansowane ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020. Projekt pt. „Opracowanie innowacyjnego automatycznego układu sterowania zintegrowanego z przeciwpożarowym działem wodnopianowym z detekcją termowizyjną i/lub światłowodową” (nr umowy: POIR.01.01.01-00-1524/20).

Autorzy składają podziękowania firmie Anita Siwek ASPROJEKT oraz wszystkim wykonawcom i podwykonawcom zaangażowanym w realizację zadań projektowych.