

Wiktor Wąsik^{a)}^{a)} *The Main School of Fire Service / Szkoła Główna Służby Pożarniczej*
Corresponding author / Autor korespondencyjny: wwasik@sgsp.edu.pl

Evaluation of the Parameters of the Dispersed Stream Generated by Various Types of Water Nozzles

Ocena parametrów strumieni rozpylonych wytwarzanych przez dysze wodne różnego typu

ABSTRACT

Purpose: The purpose of the research was to determine the parameters of the micro- and macro-structure of the streams generated by nozzles of different types, and to identify potential applications of the tested water nozzles, including firefighting and air pollution removal.

Project and methods: TF6 FCN, TF6 V, NF 15 and CW 50 water nozzles were tested. At supply pressures of 0.2 MPa, 0.4 MPa and 0.6 MPa, the basic parameters of micro- and macrostructure of the streams were measured and determined: flow rate, spray angle, mass distribution of liquid on the surface (spray intensity), non-uniformity of spray density distribution, and average droplet diameters and spray spectrum. A sputter spectrum analyser, using the photoelectric method, was used to determine the microstructural parameters of the stream.

Results: The tested nozzles generated dispersed streams with different parameters. Among the analysed nozzles, the highest degree of dispersion was obtained for the TF 6 FCN sample, whose average Sauter mean diameter (SMD) reached a value of 217.3 μm . In comparison, for the NF15 nozzle, this parameter was 945 μm . The spray spectra indicate a high homogeneity of water dispersion in the stream produced by the nozzles TF 6 FCN and CW 50. From the distribution of mass sprinkling density, the CW 50 nozzle shows the greatest uniformity of spraying. At the same time, however, it reports a small amount of water, since the value of the spray density for this product did not exceed 100 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, while for the NF 15 nozzle it was more than 2,700 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. The obtained spray angles were close to those declared by the nozzle manufacturer. In the tests of all samples, a slight effect of supply pressure on the values of this parameter was observed.

Conclusions: Among other things, the tests made it possible to conclude that in the range of supply pressures of 0.2–0.6 MPa, the values of disperse angle and spray area of the analysed nozzles were constant or the recorded differences were insignificant. In addition, it was determined that in the case of nozzles with full spray cones, an increase in supply pressure (within the range of declared operating values) has little effect on changing the parameters of the micro- and macro-structure of the stream. The conducted tests showed the potential use of two nozzles (TF6 FCN, CW 50) in low-pressure fog extinguishing systems producing fog with SMD droplet diameters > 200 μm . For the absorption of hazardous substances, it is recommended to use nozzles with a large spray angle and a full spray cone, which, as tests have shown, produce uniform streams with small droplet diameters.

Keywords: water nozzles, water spray, spray spectrum, mass spray density, water mist

Type of article: original research article

Received: 17.04.2023; Reviewed: 08.05.2023; Accepted: 10.05.2023;

Author's ORCID ID: 0000-0002-0934-3961;

Please cite as: SFT Vol. 61 Issue 1, 2023, pp. 32–52 <https://doi.org/10.12845/sft.61.1.2023.2>;

This is an open access article under the CC BY-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

ABSTRAKT

Cel: Celem badań było określenie parametrów mikro- i makrostruktury strumieni wytwarzanych przez dysze różnego typu oraz wskazanie potencjalnych zastosowań badanych dysz wodnych, w tym do gaszenia pożarów i usuwania zanieczyszczeń z powietrza.

Projekt i metody: Badaniom poddano dysze wodne TF6 FCN, TF6 V, NF 15 oraz CW 50. Przy ciśnieniu zasilania równym 0,2 MPa, 0,4 MPa oraz 0,6 MPa zmierzono i wyznaczono podstawowe parametry mikro- i makrostruktury strumieni: natężenie przepływu, kąt rozpylenia, rozkład masowy cieczy na powierzchni (intensywność zraszania), nierównomierność rozkładu gęstości zraszania oraz średnie średnice kropeł i widmo rozpylenia. Do określenia parametrów mikrostrukturalnych strumienia zastosowano analizator widma rozpylenia, wykorzystujący metodę fotoelektryczną.

Wyniki: Badane dysze generowały strumienie rozpylone o różnych parametrach. Wśród analizowanych dysz największy stopień dyspersji uzyskano dla próbki TF 6 FCN, której średnia średnica Sautera (SMD) dochodziła do wartości 217,3 μm . Dla porównania w przypadku dyszy NF15 parametr ten wynosił 945 μm . Widma rozpylenia wskazują na dużą jednorodność dyspersji wody w strumieniu wytworzonym przez dysze: TF 6 FCN i CW 50. Z rozkładu masowej gęstości zraszania wynika, że dysza CW 50 wykazuje największą równomierność zraszania. Jednocześnie podaje ona jednak małą ilość wody, ponieważ

wartość gęstości zraszania dla tego wyrobu nie przekroczyła $100 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, podczas gdy dla dyszy NF 15 wynosiła ona ponad $2700 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Uzyskane kąty rozpylenia były zbliżone do deklarowanych przez producenta dysz. W badaniach wszystkich próbek zaobserwowano niewielki wpływ ciśnienia zasilania na wartości tego parametru.

Wnioski: Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić m.in., że w przedziale ciśnień zasilania $0,2\text{--}0,6 \text{ MPa}$ wartości kąta rozpylenia oraz powierzchni zraszania analizowanych dysz były stałe lub zarejestrowane różnice były nieznaczne. Dodatkowo ustalono, że w przypadku dysz o pełnych stożkach zraszania wzrost ciśnienia zasilania (w zakresie deklarowanych wartości pracy) ma mały wpływ na zmianę parametrów mikro- i makrostruktury strumienia. Przeprowadzone badania wykazały możliwości potencjalnego zastosowania dwóch dysz (TF6 FCN, CW 50) w niskociśnieniowych mgłowych systemach gaśniczych wytwarzających mgłę o średnicy kropeł $\text{SMD} > 200 \mu\text{m}$. Do celów absorpcji substancji niebezpiecznych rekomenduje się zastosowanie dysz o dużym kącie rozpylenia i pełnym stożku zraszania, które – jak pokazały testy – wytwarzają jednorodne strumienie o małej średnicy kropeł.

Słowa kluczowe: dysze wodne, rozpylanie wody, widmo rozpylenia, masowa gęstość zraszania, mgła wodna

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

Przyjęty: 17.04.2023; Zrecenzowany: 08.05.2023; Zaakceptowany: 10.05.2023;

Identyfikator ORCID autora: 0000-0002-0934-3961;

Proszę cytować: SFT Vol. 61 Issue 1, 2023, pp. 32–52, <https://doi.org/10.12845/sft.61.1.2023.2>;

Artykuł udostępniany na licencji CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Introduction

Liquid dispersion involves the breakup of a stream into droplets as a result of the supply of mechanical energy to the stream. Devices used to atomize liquids are called atomizers or spray nozzles [1–2]. Sprayed liquids are used, among other things:

- in agriculture when spraying and irrigating plants [3–5];
- in automobiles when spraying fuel introduced into the combustion chamber [6–7];
- in fire protection – in firefighting equipment and firefighting devices [8–12];
- in industry – in cooling, purification and neutralization systems for hazardous substances and dusts [13–20].

In addition, liquid spraying is now widely used in medicine, including, for example, for disinfection, especially important during the COVID 19 pandemic [21–23]. The multitude and variety of applications of atomized liquid streams makes the technical parameters and designs of nozzles very diverse. For this reason, some of the spray devices include:

- nozzles using the energy of the liquid itself (such as jet nozzles, vortex nozzles, vortex-jet nozzles, impact nozzles);
- nozzles using gas energy (such as pneumatic nozzles) or
- nozzles using other types of energy (such as rotary, electrostatic, acoustic and ultrasonic nozzles) [1–2].

Of the aforementioned, stream, vortex and stream-vortex nozzles have the largest range of applications. This is due to their simple design, low power requirements, low failure rate and price competitiveness compared to other nozzles [24–25]. Unfortunately, their limitation is the production of streams that exhibit very different parameters, usually more polydisperse compared to at least air atomizers. This is confirmed by numerous scientific studies conducted in Poland and abroad [19, 21, 26–30]. When selecting a spray device for a given application, a detailed analysis of the stream produced by the nozzle is necessary, mainly in terms of parameters such as flow rate, spray angle,

Wstęp

Dyspersja cieczy wiąże się z rozpadem strugi na krople w wyniku dostarczania jej energii mechanicznej. Urządzenia służące do rozpylania cieczy nazywane są rozpylaczami lub dyszami rozpylającymi [1–2]. Rozpylone ciecze wykorzystywane są między innymi:

- w rolnictwie podczas oprysków i nawadniania roślin [3–5];
- w motoryzacji przy rozpylaniu paliwa wprowadzanego do komory spalania [6–7];
- w ochronie przeciwpożarowej – w sprzęcie pożarniczym i urządzeniach gaśniczych [8–12];
- w przemyśle – w układach chłodzenia, oczyszczania i neutralizacji substancji niebezpiecznych i pyłów [13–20].

Ponadto rozpylanie cieczy ma obecnie szerokie zastosowanie w medycynie, w tym np. do dezynfekcji, szczególnie ważnej w czasie pandemii COVID 19 [21–23]. Mnogość i różnorodność zastosowań rozpylonych strumieni cieczy sprawia, że parametry techniczne i konstrukcje rozpylaczy są bardzo zróżnicowane. Z tego względu wśród urządzeń rozpylających można wymienić m.in.:

- rozpylacze wykorzystujące energię samej cieczy (takie jak rozpylacze strumieniowe, rozpylacze wirowe, rozpylacze strumieniowo-wirowe, rozpylacze uderzeniowe);
- rozpylacze wykorzystujące energię gazu (takie jak rozpylacze pneumatyczne) czy
- rozpylacze wykorzystujące inne rodzaje energii (np. rozpylacze rotacyjne, elektrostatyczne, akustyczne i ultradźwiękowe) [1–2].

Spośród wymienionych wyżej największy zakres zastosowań mają rozpylacze: strumieniowe, wirowe i strumieniowo-wirowe. Wynika to z ich prostej budowy, małego zapotrzebowania na moc, małej awaryjności oraz konkurencyjności cenowej w porównaniu z pozostałymi rozpylaczami [24–25]. Niestety ich ograniczeniem jest wytwarzanie strumieni, które wykazują bardzo zróżnicowane parametry, zazwyczaj bardziej polidispersyjne w porównaniu chociażby z rozpylaczami pneumatycznymi. Potwierdzają

spray intensity or mass stream density, non-uniformity of spray intensity distribution, and average droplet diameters and spray spectrum. In numerous nozzle tests, their stream parameters are evaluated at different water supply pressures [17, 21, 23, 27–32]. The purpose is to determine the effect of this parameter on dispersion, and thus to identify potential limitations or advantages in the use of a particular nozzle.

This article contains the results of a test of the parameters of the streams produced by water nozzles of various types. The purpose of this research was to determine the potential application area of the analysed nozzles, especially in the context of fire-fighting and reducing the concentration of hazardous substances in the air. However, it should be emphasized that the presented results can also be helpful in determining the usefulness of the studied products in other areas, such as agriculture or industry. The research made it possible to select those design features of the nozzles that will be useful in the processes of extinguishing and neutralizing hazardous substances.

Research methodology

The tests were carried out on a test bench with the following main components: a cubic test chamber with a side length of 1.2 m made of plastic, a water supply system consisting of, among other things, a water tank, a pump and piping with fittings, a power and control cabinet, a computer with software for control and data recording, and the water nozzles under test. In addition, the following items and measuring instruments constituted the equipment of the station:

- spray spectrum analyser [33],
- Pt 100 water temperature sensor (range up to 60°C),
- pressure sensor (range up to 1 MPa, accuracy class 0.5),
- electromagnetic flow meter (range up to 1000 dm³/h, accuracy 0.5% of measured value),
- precision scale (range up to 2 kg and accuracy of 0.01 g).

A diagram of the measuring bench is included in the publication [34]. The general appearance of the measuring bench is shown in Figure 1.

The following water nozzles were used in the study:

- spiral TF 6 FCN with a full spray cone and a maximum spray angle of 90° [35],
- spiral TF 6 V with a hollow spray cone and a maximum spray angle of 60° [36],
- with a flat NF 15 spray stream and a spray angle of about 65° [37],
- axial with full spray cone and a spray angle of 80° (CW 50) [38].

to liczne badania naukowe prowadzone w kraju i za granicą [19, 21, 26–30]. Przy doborze urządzenia rozpylającego do danego zastosowania niezbędna jest szczegółowa analiza wytwarzanego przez dyszę strumienia, głównie w kontekście parametrów, takich jak: natężenie przepływu, kąt rozpylenia, intensywność zraszania lub gęstość strumienia masy, nierównomierność rozkładu intensywności zraszania oraz średnie średnice kropeł i widmo rozpylenia. W licznych badaniach rozpylaczy ich parametry strumienia oceniane są przy różnych ciśnieniach zasilania wodą [17, 21, 23, 27–32]. Ma to na celu określenie wpływu tego parametru na dyspersję, a co za tym idzie wskazanie potencjalnych ograniczeń lub zalet w zastosowaniu danego rozpylacza.

Niniejszy artykuł zawiera wyniki badań parametrów strumieni wytwarzanych przez dysze wodne różnego typu. Celem tych badań było określenie potencjalnego obszaru zastosowania analizowanych dysz, zwłaszcza w kontekście gaszenia pożarów oraz ograniczania stężenia substancji niebezpiecznych w powietrzu. Należy jednak zaznaczyć, że zaprezentowane wyniki mogą być również pomocne w określeniu przydatności badanych wyrobów w innych obszarach, jak chociażby rolnictwo czy przemysł. Badania umożliwiły wytypowanie tych cech konstrukcyjnych dysz, które będą przydatne w procesach gaszenia oraz neutralizacji substancji niebezpiecznych.

Metodyka badawcza

Badania zostały wykonane na stanowisku pomiarowym, z następującymi głównymi elementami: sześcienna komora badawcza o boku długości 1,2 m wykonana z tworzywa sztucznego, układ zasilania w wodę składający się m.in. ze zbiornika na wodę, pompy i przewodów rurowych z armaturą, szafy zasilająco-sterowniczej, komputera z oprogramowaniem do sterowania i rejestracji danych oraz badanych dysz wodnych. Ponadto wyposażenie stanowiska stanowiły następujące elementy i przyrządy pomiarowe:

- analizator widma rozpylenia [33],
- czujnik temperatury wody Pt 100 (zakres do 60°C),
- czujnik ciśnienia (zakres do 1 MPa, klasa dokładności 0,5),
- przepływomierz elektromagnetyczny (zakres do 1000 dm³/h, dokładność 0,5 % wartości mierzonej),
- waga precyzyjna (zakres do 2 kg i dokładności 0,01 g).

Schemat stanowiska pomiarowego zawarto w opracowaniu [34]. Ogólny wygląd stanowiska pomiarowego przedstawia rycina 1.

W badaniach użyto następujących dysz wodnych:

- spiralną TF 6 FCN o pełnym stożku zraszania i max. kącie rozpylenia 90° [35],
- spiralną TF 6 V o pustym stożku zraszania i max. kącie rozpylenia 60° [36],
- o płaskim strumieniu zraszania NF 15 i kącie rozpylenia około 65° [37],
- osiową o pełnym stożku zraszania i kącie rozpylenia 80° (CW 50) [38].

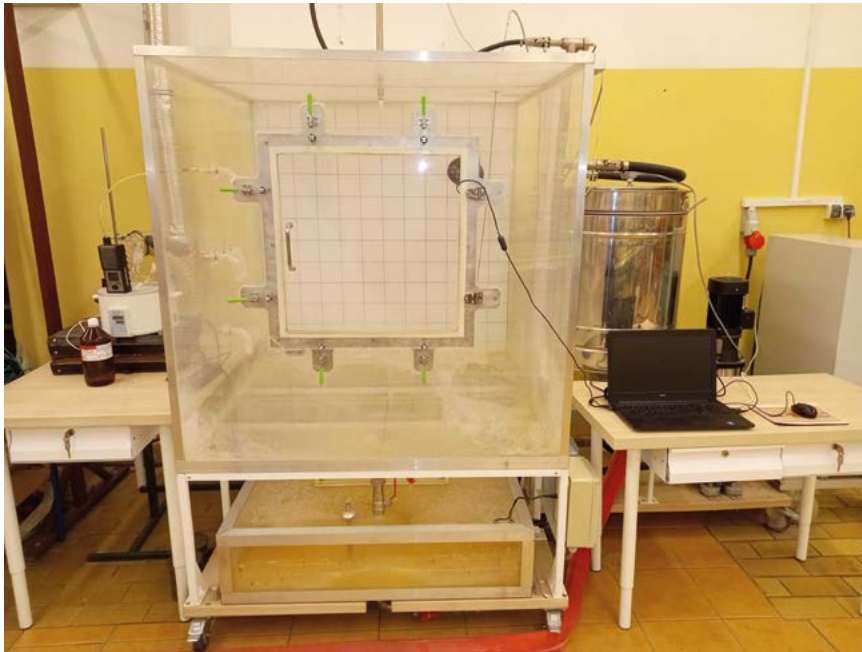


Figure 1. General appearance of the measuring bench
Rycina 1. Ogólny wygląd stanowiska pomiarowego

Source: Own elaboration.
Źródło: Opracowanie własne.

The appearance of the tested nozzles is shown in Figure 2.

Wygląd badanych dyszy przedstawia rycina 2.



Figure 2. Tested nozzles (from left: TF 6 FCN, TF 6 V, NF 15, CW 50)
Rycina 2. Dysze poddane badaniu (od lewej: TF 6 FCN, TF 6 V, NF 15, CW 50)

Source: Own elaboration.
Źródło: Opracowanie własne.

The following stream parameters were determined as part of the study: average number diameter of droplets D_n [34], average surface diameter of droplets D_s [39–40], average volumetric diameter of droplets D_v [41–42], average Sauter mean diameter SMD [22, 43], spray spectrum relative to diameter D_s and

W ramach badań wyznaczono następujące parametry strumienia: średnią średnicę ilościową kropel D_n [34], średnią średnicę powierzchniową kropel D_s [39–40], średnią średnicę objętościową kropel D_v [41–42], średnią średnicę Sautera SMD [22, 43], widmo rozpylenia względem średnicy D_s oraz średnicy powierzchniowej

surface diameter $D_{s_{0,g}}$, mass stream density distribution, sprinkler non-uniformity, flow rate and spray angle.

The spray angle α is the apex angle of the spray [1], formed between two straight lines along the stream flowing out of the nozzle. This is an important parameter in the process of spraying water, which, among other things, determines the coverage of a surface or filling a space with water [26]. It also decides on the number of nozzles in the system and their mutual spacing in the piping system [23]. The value of the angle α is strictly dependent on the dimensions and design of the nozzle, the properties of the fed liquid, the density of the medium in which the process takes place, and the operating conditions of the nozzle [24, 26].

The test of the spray angle was carried out using a photographic method, by taking pictures of the stream against a reference dimension table. However, it should be kept in mind that as the distance from the nozzle increases, the dispersed stream narrows, which is mainly due to the action of the surrounding gas, which is set in motion by the aspirating action of the stream [25]. Therefore, the zone directly at the nozzle outlet was considered for determining the angle α . The angle was measured using a graphics program, in which the photograph was dimensioned. An example of how to determine the spray angle is shown in Figure 3.



Figure 3. Spray angle for NF 15 nozzle at 0.4 MPa pressure
Rycina 3. Kąt rozpylenia dla dyszy NF 15 przy ciśnieniu 0,4 MPa
Source: Own elaboration.
Źródło: Opracowanie własne.

Another parameter determined in the tests was the density of the liquid stream (q_m), defined as the ratio of the mass stream to the area perpendicular to the atomizer axis ΔA [31]:

$$q_m = \frac{\Delta \dot{m}}{\Delta A} \quad (1)$$

where:

q_m – density of the fluid mass stream [$g/(s \cdot m^2)$],
 $\Delta \dot{m}$ – elementary stream of liquid mass [g/s],
 ΔA – elementary surface perpendicular to the axis of the nozzle [m^2].

In a research [31] it was proved that for a spiral nozzle the values of mass stream density significantly change as a function of the height from which spraying occurs. For this reason, a fixed distance of the nozzle outlet from the top of the measuring containers was established in all tests.

$D_{s_{0,g}}$, rozkład gęstości strumienia masy, nierównomierność zraszania, natężenie przepływu oraz kąt rozpylenia.

Kąt rozpylenia α jest to kąt wierzchołkowy rozpylonego strumienia [1], utworzonego między dwiema liniami prostymi wzdłuż strumienia wypływającego z rozpylacza. Jest to ważny parametr w procesie rozpylania wody, który m.in. decyduje o pokryciu powierzchni lub wypełnieniu przestrzeni wodą [26]. Decyduje on również o liczbie dysz w instalacji i ich wzajemnym rozstawieniu w układzie rurociągów [23]. Wartość kąta α jest ściśle zależna od wymiarów i budowy rozpylacza, właściwości podawanej cieczy, gęstości ośrodka, w którym zachodzi proces, oraz warunków pracy rozpylacza [24, 26].

Badanie kąta rozpylenia przeprowadzono metodą fotograficzną, przez wykonanie zdjęć strumienia na tle tablicy z wymiarami odniesienia. Należy jednak pamiętać, że wraz ze wzrostem odległości od dyszy rozpylony strumień ulega zwężeniu, co wynika głównie z działania otaczającego go gazu, który zostaje wprawiony w ruch przez zasysające działanie strumienia [25]. Z tego względu do wyznaczenia kąta α uwzględniana była strefa bezpośrednio przy wylocie dyszy. Pomiaru kąta dokonano przy pomocy programu graficznego, w którym zwymiarowano fotografię. Przykładowy sposób wyznaczenia kąta rozpylenia przedstawiono na rycinie 3.

Kolejnym wyznaczanym w badaniach parametrem była gęstość strumienia cieczy (q_m), określana jako stosunek strumienia masy do powierzchni prostopadłej względem osi rozpylacza ΔA [31]:

$$q_m = \frac{\Delta \dot{m}}{\Delta A} \quad (1)$$

gdzie:

q_m – gęstość strumienia masy cieczy [$g/(s \cdot m^2)$],
 $\Delta \dot{m}$ – elementarny strumień masy cieczy [g/s],
 ΔA – elementarna powierzchnia prostopadła do osi rozpylacza [m^2].

W badaniach [31] udowodniono, że dla dyszy spiralnych wartości gęstości strumienia masy znacząco zmieniają się w funkcji wysokości, z której następuje zraszanie. Z tego względu we wszystkich badaniach ustalono stałą odległość wylotu dyszy od górnej krawędzi pojemników pomiarowych.

Very often in scientific articles [17, 27, 44, 45] and standards [46–49], the density of the liquid stream is defined as the intensity of spraying and expressed in the unit mm/min or $l/(m^2 \cdot \text{min})$. For a given spraying area, in addition to the density of the mass stream, the inequality of the spray distribution (I) was also determined. The parameter I was determined from the measurements of the nozzle's density distribution and calculated from the below equation [24].

$$I = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_{\text{eq}}} 100\% \quad (2)$$

where:

- I – unevenness of the distribution of sprinkling density [%],
- q_{\max} – maximum mass stream density in the analysed spray zone [$\text{g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$],
- q_{\min} – minimum stream density in the analysed spray zone [$\text{g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$],
- q_{eq} – average stream density in the analysed spray zone [$\text{g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$].

The test of the density of the liquid stream was performed using the weight method. Water was collected into cylindrical measuring containers with a diameter of 64.5 mm, which was then weighed and qm was calculated based on equation (1). In all tests, the distance of the nozzle outlet plane to the top edge of the measuring containers was 1.0 ± 0.01 m. Water was applied in such a way as to achieve the longest possible spraying time, but not to overflow any of the measuring containers. The liquid stream density test was conducted for a quarter of the nozzle spray area. The measurement points were arranged according to the diagram shown in Figure 4. From the results obtained in Surfer®16 program by Golden Software, distributions of liquid stream density were made for the measurement space.

Bardzo często w artykułach naukowych [17, 27, 44, 45] i normach [46–49] gęstość strumienia cieczy jest określana jako intensywność zraszania i wyrażona jednostką mm/min lub $l/(m^2 \cdot \text{min})$. Dla danej powierzchni zraszania oprócz gęstości strumienia masy wyznaczono również nierównomierność rozkładu zraszania (I). Parametr I wyznaczony został na podstawie pomiarów rozkładu gęstości zraszania dyszy i obliczany z poniższego wzoru [24].

$$I = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_{\text{eq}}} 100\% \quad (2)$$

gdzie:

- I – nierównomierność rozkładu gęstości zraszania [%],
- q_{\max} – maksymalna gęstość strumienia masy w analizowanej strefie zraszania [$\text{g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$],
- q_{\min} – minimalna gęstość strumienia w analizowanej strefie zraszania [$\text{g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$],
- q_{eq} – średnia gęstość strumienia w analizowanej strefie zraszania [$\text{g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$].

Badanie gęstości strumienia cieczy wykonano metodą wagową. Do cylindrycznych pojemników pomiarowych o średnicy 64,5 mm zbierano wodę, którą następnie ważono i na podstawie wzoru (1) obliczano qm . We wszystkich badaniach odległość płaszczyzny wylotu dyszy do górnej krawędzi pojemników pomiarowych wynosiła $1,0 \pm 0,01$ m. Wodę podawano tak, by osiągnąć jak najdłuższy czas zraszania, lecz nie przepełnić żadnego z pojemników pomiarowych. Badanie gęstości strumienia cieczy przeprowadzono dla jednej czwartej obszaru zraszania dyszy. Punkty pomiarowe były rozmieszczone zgodnie ze schematem przedstawionym na rycinie 4. Z otrzymanych wyników w programie Surfer®16 firmy Golden Software wykonano rozkłady gęstości strumienia cieczy dla przestrzeni pomiarowej.

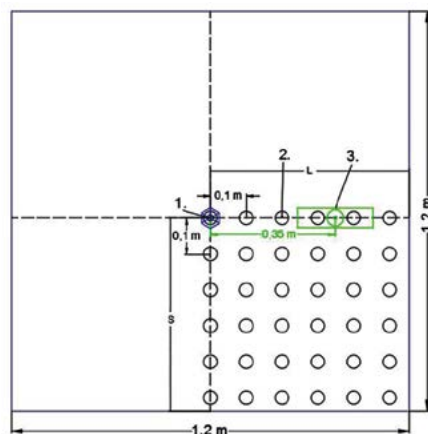


Figure 4. Arrangement of measurement points during testing of liquid stream density and microstructure parameters (top view of the base of the test chamber): 1 – position of the nozzle and measuring probe for testing the microstructure parameters of the spray stream produced by the NF 15 and CW 50 nozzle, 2 – measuring containers for testing the density of the stream of liquid, 3 – setting up a measuring probe to study the microstructure parameters of the spray streams of TF 6 FCN and FT6 V spiral nozzles

Rycina 4. Rozmieszczenie punktów pomiarowych podczas badania gęstości strumienia cieczy oraz parametrów mikrostruktury (rzut z góry na podstawę komory badawczej): 1 – położenie dyszy i sondy pomiarowej do badania parametrów mikrostruktury strumienia rozpylonego wytworzonego przez dyszę NF 15 i CW 50, 2 – pojemniki pomiarowe do badania gęstości strumienia cieczy, 3 – ustawienie sondy pomiarowej do badania parametrów mikrostruktury strumieni rozpylonych dysz spiralnych TF 6 FCN i FT6 V

Source / Źródło: W. Wąsik, M. Majder-Łopatka, W. Rogula-Kozłowska, *Influence of micro- and macrostructure of atomized water jets on ammonia absorption efficiency*, "Sustainability" 2022, 14, 9693, <https://doi.org/10.3390/su14159693> [34].

After establishing the parameters determining the stream's macrostructure, its microstructure was measured. The microstructure of the spray is most often parameterized by the mean and maximum droplet diameters, the uniformity and degree of atomization, the spray spectrum, and the specific surface area of the droplets [24]. The literature [22] defines equation (3), based on which it is possible to describe several typical types of droplet diameters. The results of this equation provide various information and are widely used [22].

$$D_{pq} = \sqrt[p-q]{\frac{\sum_{i=1}^m D_i^p \Delta n_i}{\sum_{i=1}^m D_i^q \Delta n_i}} \quad (3)$$

where:

- D_i – diameter of droplets in a given range,
- Δn_i – number of drops in a given range,
- p, q – exponents to indicate a particular type of diameter, e.g. surface diameter D_{20} (or D_s).

The most practical applications and the most commonly determined for nozzles are the mean diameter: surface D_{20} (D_s) [34], volumetric D_{30} (D_v) [41–42], and volume-surface, the so-called Sauter mean diameter D_{32} (SMD) [13, 18, 21, 26]. Of those listed, Sauter's mean diameter is the most universal and appears in publications from various scientific fields. It is particularly useful for determining the course of heat and mass transfer processes (e.g. cooling, absorption) [2]. The diameter of the SMD droplets is determined by the below equation [22]:

$$D_{32} = \text{SMD} = \frac{\sum_{i=1}^{n=i} \Delta n_i \cdot D_i^3}{\sum_{i=1}^{n=i} \Delta n_i \cdot D_i^2} \quad (4)$$

where:

- SMD – Sauter's mean diameter, μm ,
- D_i – diameter of droplets in a given range, $[\mu\text{m}]$,
- Δn_i – number of drops in a given interval, pcs.

The percentage of droplets with specific diameters/volumes in the total distribution of the spray spectrum is indicated by the symbols D_{V50} , D_{V10} and D_{V90} ($D_{0,90}$), D_{V95} ($D_{0,95}$), or D_{S90} ($D_{S0,9}$), for example [1, 17, 21, 23, 26]. For instance, the D_{S90} diameter represents the value for which 90% of the total area of the produced droplets is achievable. A measure of the uniformity of the spray is the difference between these diameters [23], as detailed in [1] and [24]. Moreover, diameter values representing shares of more than 90% of the total volume or surface area of the spray are often the basis for determining the maximum spray diameter D_{max} [2].

An IPS droplet spectrum analyser (AWK) was used to study the microstructure of dispersed water streams. In operation, the instrument uses the photoelectric method and is often used in scientific research [17, 42, 45, 15]. In the measuring probe of the AWK analyser, the light signal is changed to an electrical

Po wyznaczeniu parametrów określających makrostrukturę strumienia dokonano pomiarów jej mikrostruktury. Mikrostruktura rozpylonego strumienia jest najczęściej parametryzowana przez średnie i maksymalne średnice kropeł, jednorodność i stopień rozpylenia, widmo rozpylenia oraz powierzchnię właściwą kropeł [24]. W literaturze [22] określono równanie (3), na podstawie którego istnieje możliwość opisanie kilku typowych rodzajów średnic kropeł. Wyniki tego równania dostarczają różnych informacji i znajdują szerokie wykorzystanie [22].

$$D_{pq} = \sqrt[p-q]{\frac{\sum_{i=1}^m D_i^p \Delta n_i}{\sum_{i=1}^m D_i^q \Delta n_i}} \quad (3)$$

gdzie:

- D_i – średnica kropeł w danym przedziale,
- Δn_i – liczba kropeł w danym przedziale,
- p, q – wykładniki do oznaczania danego rodzaju średnicy np. średnica powierzchniowa D_{20} (lub D_s).

Największe zastosowanie praktyczne oraz najczęściej wyznaczone dla rozpylaczy są średnia średnica: powierzchniowa D_{20} (D_s) [34], objętościowa D_{30} (D_v) [41–42], i objętościowo-powierzchniowa, tak zwana średnia średnica Sautera D_{32} (SMD) [13, 18, 21, 26]. Spośród wymienionych najbardziej uniwersalna i pojawiająca się w publikacjach z różnych dziedzin nauki jest średnia średnica Sautera. Jest ona szczególnie przydatna do określenia przebiegu procesu wymiany ciepła i masy (np. chłodzenie, absorpcja) [2]. Średnica kropeł SMD wyznaczana jest na podstawie poniższego wzoru [22]:

$$D_{32} = \text{SMD} = \frac{\sum_{i=1}^{n=i} \Delta n_i \cdot D_i^3}{\sum_{i=1}^{n=i} \Delta n_i \cdot D_i^2} \quad (4)$$

gdzie:

- SMD – średnica średnica Sautera, μm ,
- D_i – średnica kropeł w danym przedziale, $[\mu\text{m}]$,
- Δn_i – liczba kropeł w danym przedziale, szt.

Udział procentowy kropeł o określonych średnicach/objętości w całości rozkładu widma rozpylonego oznacza się np. symbolami D_{V50} , D_{V10} i D_{V90} ($D_{0,90}$), D_{V95} ($D_{0,95}$), czy D_{S90} ($D_{S0,9}$) [1, 17, 21, 23, 26]. Dla przykładu średnica D_{S90} oznacza wartość, dla której osiągalny jest poziom 90% łącznej powierzchni wytwarzanych kropeł. Miarą jednorodności rozpylenia jest różnica między tymi średnicami [23], co szczegółowo opisano w [1] i [24]. Ponadto wartości średnicy stanowiącej udziały powyżej 90% całej objętości lub powierzchni rozpylonej cieczy są często podstawą do określania średnicy maksymalnej rozpylenia D_{max} [2].

Do badania mikrostruktury rozpylonych strumieni wody wykorzystano analizator widma kropeł IPS (AWK). W działaniu przyrząd wykorzystując metodę fotoelektryczną i jest często stosowany w badaniach naukowych [17, 42, 45, 15]. W sondzie pomiarowej analizatora AWK następuje zmiana sygnału świetlnego na impuls

pulse corresponding to the given diameter of the droplet moving through the measuring space [33]. The analyser has a measurement range of $0.5 \mu\text{m}$ to $3,000 \mu\text{m}$, and during the tests the instrument was set to have a minimum data recording time of 180 seconds. The measuring probe was positioned in the area with the highest spraying intensity. In the tests of spiral nozzles, the analyser's measuring probe was not positioned directly under the nozzle but in the area of the main spraying ring, as explained by the tests described in [27]. The position of the measuring probe during testing is shown in Figure 4. As part of the results obtained from AWK, the following parameters were analysed: average diameters D_n , D_s , D_v , SMD , sputtering spectrum relative to diameter D_s and surface diameter $D_{s0,9}$.

In the tests of microstructure parameters, the plane of the nozzle outlet was 0.8 ± 0.01 m away from the top edge of the inlet of the analyser's measuring probe. Tests of all stream parameters for each nozzle were performed at supply pressures of 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa. The water pressure was measured directly in front of the water nozzle.

The following general criteria and measurement uncertainties were used in the tests:

- uncertainty of spray angle measurement $\pm 2^\circ$,
- uncertainty of length measurement ± 0.01 m,
- uncertainty of droplet diameter measurement based on [24, 33] for the number of droplets above 35,000 $\pm 2\%$, and below 35,000 $\pm 5\%$,
- deviation from the set value of the nozzle supply pressure ± 0.005 MPa,
- uncertainty of time measurement ± 1 s,
- set water temperature in the range of $20 \pm 2^\circ\text{C}$,
- set ambient temperature in the range of $20 \pm 4^\circ\text{C}$.

Test results

The obtained results are shown in Tables 1–4 and Figures 5–12. In all illustrations containing dispersed spectra, the following symbols were used: B_s – the percentage of a given interval of D_s diameters in the entire distribution, Φ – the value of the distribution's characteristic, D_{si} – the value of the average of D_s diameters in the i -th interval. The mass density distribution of the spray at 0,0 marked with a circle shows the axis of water outflow from the tested nozzle.

elektryczny odpowiadający danej średnicy kropli przemieszczającej się przez przestrzeń pomiarową [33]. Analizator posiada zakres pomiarowy od $0,5 \mu\text{m}$ do $3000 \mu\text{m}$, a w czasie badań przyrząd był ustawiony tak, by czas rejestracji danych wynosił minimum 180 sekund. Sondę pomiarową ustawiono w obszarze o największej intensywności zraszania. W badaniach dysz spiralnych sonda pomiarowa analizatora nie była ustawiona bezpośrednio pod dyszą tylko w obszarze głównego pierścienia zraszania, co zostało wyjaśnione badaniami opisanymi w [27]. Położenie sondy pomiarowej w czasie badań przedstawiono na rycinie 4. W ramach wyników uzyskanych z AWK analizie poddano następujące parametry: średnie średnice D_n , D_s , D_v , SMD , widmo rozpylenia względem średnicy D_s oraz średnicy powierzchniowej $D_{s0,9}$.

W badaniach parametrów mikrostruktury płaszczyzna wylotu dyszy była oddalona o $0,8 \pm 0,01$ m od górnej krawędzi wlotu sondy pomiarowej analizatora.

Badania wszystkich parametrów strumienia dla każdej z dysz były wykonywane przy ciśnieniu zasilania wynoszącym 0,2 MPa, 0,4 MPa, 0,6 MPa. Ciśnienie wody mierzono bezpośrednio przed dyszą wodną.

W badaniach zastosowano następujące kryteria ogólne i niepewności pomiarowe:

- niepewność pomiaru kąta rozpylenia $\pm 2^\circ$,
- niepewność pomiaru długości $\pm 0,01$ m,
- niepewność pomiaru średnicy kropelek na podstawie [24, 33] dla liczby kropelek powyżej 35000 $\pm 2\%$, a poniżej 35000 $\pm 5\%$,
- odchylenie od zadanej wartości ciśnienia zasilania dyszy $\pm 0,005$ MPa,
- niepewność pomiaru czasu ± 1 s,
- zadana temperatura wody w przedziale $20 \pm 2^\circ\text{C}$,
- zadana temperatura otoczenia w przedziale $20 \pm 4^\circ\text{C}$.

Wyniki badań

Otrzymane wyniki badań zostały przedstawione w tabelach 1–4 oraz na rycinach 5–12. Na wszystkich ilustracjach zawierających widma rozpylenia zastosowano następujące oznaczenia: B_s – udział procentowy danego przedziału średnic D_s w całym rozkładzie, Φ – wartość dystrybuanty rozkładu, D_{si} – wartość średniej średnic D_s w i -tym przedziale. Na rozkładach masowej gęstości zraszania w punkcie 0,0 oznaczonym kołem przedstawiono oś wypływu wody z badanej dyszy.

Table 1. Test results for TF 6 FCN nozzle
Tabela 1. Wyniki badań dla dyszy TF 6 FCN

Parameter / Parametr	Unit / Jednostka	Symbol / Symbol	Supply pressure of the nozzle / Ciśnienie zasilania dyszy		
			0.2 MPa	0.4 MPa	0.6 MPa
Number of counted droplets / Liczba zliczonych kropeł	[pcs.] / [szt.]	N	66,219	69,287	65,656
Measurement time of microstructure parameters / Czas pomiaru parametrów mikrostruktury	[sec.] / [sek.]	t	180	180	180
Average quantity diameter / Średnia średnica ilościowa	[μm]	Dn	160.5	133.8	135.6
Average surface diameter / Średnia średnica powierzchniowa	[μm]	Ds	184.5	158.4	156.5
Average volume diameter / Średnia średnica objętościowa	[μm]	Dv	205.4	180.2	174.6
Average Sauter's mean diameter / Średnia średnica Sautera	[μm]	SMD	254.8	233.4	217.3
90% surface diameter / Średnica powierzchniowa 90%	[μm]	D _{S0,9}	383.5	360.5	324.5
90% volume diameter / Średnica objętościowa 90%	[μm]	D _{V0,9}	419.5	399.5	357.0
Supply pressure of the nozzle (average) / Ciśnienie zasilania dyszy (średnia)	[MPa]	p	0.200	0.401	0.597
Standard deviation of pressure measurement / Odchylenie standardowe pomiaru ciśnienia	[MPa]	δp	0.001	0.001	0.001
Nozzle performance (average) / Wydajność dyszy (średnia)	[dm ³ /h]	Q	281.01	392.08	483.66
Standard deviation of pressure measurement / Odchylenie standardowe pomiaru ciśnienia	[dm ³ /h]	δQ	0.45	0.27	0.32
Spray angle / Kąt rozpylenia	[°]	α	84	84	84
Maximum spraying density / Kąt rozpylenia	[g/(s · m ²)]	q _{max}	143.8	129.8	201.3
Minimum spraying density / Minimalna gęstość zraszania	[g/(s · m ²)]	q _{mini}	7.48	23.03	37.16
Average spraying density / Średnia gęstość zraszania	[g/(s · m ²)]	q _{eq}	58.93	76.14	82.14
Distribution irregularity of spraying density / Nierównomierność rozkładu gęstości zraszania	[%]	I	231.25	140.20	199.84

Source: Own elaboration.
 Źródło: Opracowanie własne.

The tested TF 6 FCN nozzle has flow rates close to the manufacturer's data, but the determined spray angle is slightly smaller than declared [35]. It should be pointed out that the change in supply pressure does not, for the TF 6 FCN nozzle, cause significant changes in the spray angle, as well as in the average diameters of the produced droplets. Even with a maximum diameter

Badana dysza TF 6 FCN posiada przepływy zbliżone do danych producenta, jednak wyznaczony kąt rozpylenia jest nieco mniejszy od deklarowanego [35]. Należy zauważyć, że zmiana ciśnienia zasilania nie powoduje dla dyszy TF 6 FCN istotnych zmian kąta rozpylenia, jak również średnich średnic wytwarzanych kropeł. Nawet w przypadku średnicy maksymalnej $D_{S0,9}$,

of $D_{50,9}$, an increase in nozzle supply pressure from 0.2 MPa to 0.6 MPa resulted in a change of only 50 μm in this parameter. This shows that in the analysed pressure range in terms of microstructure, the nozzle shows high stability.

wzrost ciśnienia zasilania dyszy z 0,2 MPa na 0,6 MPa spowodował zmianę wartości tego parametru o zaledwie 50 μm . Świadczy to o tym, że w analizowanym zakresie ciśnień pod względem mikrostrukturalnym dysza wykazuje dużą stabilność.

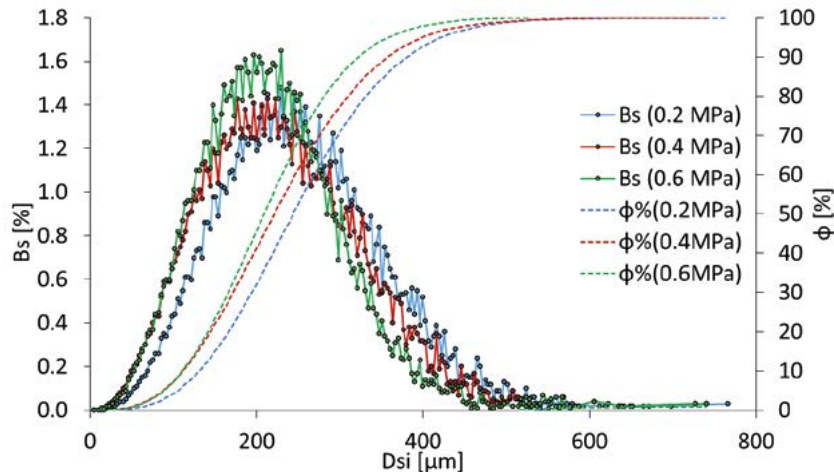


Figure 5. Spray spectrum for TF 6 FCN nozzle
Rycina 5. Widmo rozpylenia dla dyszy TF 6 FCN

Source: Own elaboration.
Źródło: Opracowanie własne.

Evaluating the tested nozzle against standards [48–49] for water fog used for firefighting purposes, the TF 6 FCN nozzle can be considered a fog nozzle. Water fog is a water stream generated by a nozzle for which the value of $D_{v0,9}$ is less than 1000 μm at the minimum pressure of its supply [42, 48]. After converting the data obtained for the TF6 FCN nozzle at a supply pressure of 0.2 MPa, the $D_{v0,9}$ value is about 420 μm . It is worth emphasizing that, according to NFPA 750 [49], this is the value to classify the produced water fog into class three.

Oceniając badaną dyszę względem standardów [48–49] dla mgły wodnej stosowanej do celów gaśniczych, można uznać, że dysza TF 6 FCN jest dyszą mgłową. Mgła wodna to strumień wody generowany przez dyszę, dla którego wartość $D_{v0,9}$ jest mniejsza niż 1000 μm przy minimalnym ciśnieniu jej zasilania [42, 48]. Po przeliczeniu danych uzyskanych dla dyszy TF6 FCN przy ciśnieniu zasilania 0,2 MPa wartość $D_{v0,9}$ wynosi około 420 μm . Warto zaznaczyć, że zgodnie z normą NFPA 750 [49] jest to wartość pozwalająca zaklasyfikować wytwarzaną mgłę wodną do klasy trzeciej. Niemniej jednak granica między drugą a trzecią klasą mgły wodnej wynosi 400 μm i przy większych ciśnieniach zasilania dyszy TF 6 FCN wytworzoną mgłę wodną klasyfikuje się do drugiej grupy.

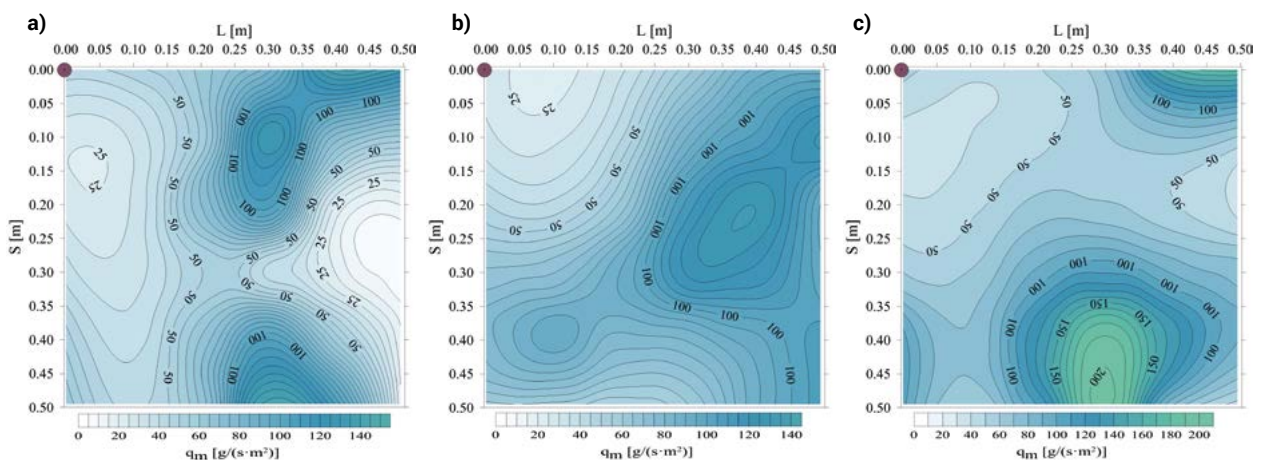


Figure 6. Distribution of mass spraying density of TF 6 FCN nozzle at supply pressure: a) 0.2 MPa, b) 0.4 MPa, c) 0.6 MPa
Rycina 6. Rozkład masowej gęstości zraszania dyszy TF 6 FCN przy ciśnieniu zasilania: a) 0,2 MPa, b) 0,4 MPa, c) 0,6 MPa

Source: Own elaboration.
Źródło: Opracowanie własne.

The TF6 FCN nozzle relatively evenly sprays the area being tested, but in all distributions of spray density, the areas where more water is applied are clearly visible. Furthermore, despite being classified as a nozzle that generates a full cone spray, small qm values were obtained in all tests directly under the nozzle outlet. The values of mass stream density obtained in the tests are relatively small and oscillate around the minimum value of spraying intensity of 2 mm/min for sprinklers [46]. In addition, according to literature data [41–42], the desired value of the size of the average volume diameter D_v of the extinguishing streams should be in the range of 200–400 μm . The TF 6 FCN nozzle generates droplets with a slightly smaller diameter, so presumably there could be a problem with ensuring adequate cooling of the combustible material. This feature is particularly important in large fires involving solids. Given the above, the TF 6 FCN nozzle in water extinguishing systems should be used as a fog nozzle, the main task of which is to reduce the temperature of the fire gases and prevent the fire from spreading, rather than extinguishing it. The TF 6 FCN nozzle, due to its areas of increased spray density, should probably not be used in agricultural spray systems. Due to the large spray angle of the TF 6 FCN nozzle, the small diameter of the droplets and their uniformity, the full spraying cone, this nozzle achieves a high efficiency of absorption of gaseous hazardous substitutes. This has been confirmed by tests [17].

Dysza TF6 FCN stosunkowo równomiernie zrasza badany obszar, jednak we wszystkich rozkładach gęstości zraszania widać wyraźnie obszary, w które podawana jest większa ilość wody. Ponadto, pomimo że jest to dysza zaklasyfikowana jako generująca strumień o pełnym stożku zraszania, to we wszystkich próbach bezpośrednio pod wylotem dyszy uzyskano małe wartości qm . Wartości gęstości strumienia masy uzyskane w badaniach są stosunkowo niewielkie i oscylują w okolicach minimalnej wartości intensywności zraszania wynoszącej dla tryskaczy 2 mm/min [46]. Co więcej, jak podają dane literaturowe [41–42], pożądana wartość wielkości średniej średnicy objętościowej D_v strumieni gaśniczych powinna zawierać się w zakresie 200–400 μm . Dysza TF 6 FCN generuje krople o nieco mniejszej średnicy, co sprawia, że przypuszczalnie mógłby pojawić się problem z zapewnieniem odpowiedniego chłodzenia materiału palnego. Funkcja ta jest szczególnie istotna w przypadku dużych pożarów ciał stałych. Z uwagi na powyższe dysza TF 6 FCN w wodnych systemach gaśniczych powinna być stosowana jako dysza mgłowa, której głównym zadaniem jest obniżenie temperatury gazów pożarowych i niedopuszczenie do rozprzestrzeniania się pożaru, a nie jego zgaszenia. Dysza TF 6 FCN, z racji posiadanych obszarów o podwyższonej gęstości zraszania, najprawdopodobniej nie powinna być stosowana w układach opryskowych w rolnictwie. Dzięki dużej wartości kąta rozpylania dyszy TF 6 FCN, małej średnicy kropeł i ich równomierności, pełnemu stożkowi zraszania dysza ta osiąga dużą skuteczność absorpcji gazowych substytucji niebezpiecznych. Zostało to potwierdzone badaniami [17].

Table 2. Test results for TF 6 V nozzle
Tabela 2. Wyniki badań dla dyszy TF 6 V

Parameter / Parametr	Unit / Jednostka	Symbol / Symbol	Supply pressure of the nozzle / Ciśnienie zasilania dyszy		
			0.2 MPa	0.4 MPa	0.6 MPa
Number of counted droplets / Liczba zliczonych kropeł	[pcs.] / [szt.]	N	59,569	199,328	323,853
Measurement time of microstructure parameters / Czas pomiaru parametrów mikrostruktury	[sec.] / [sek.]	t	180	180	180
Average quantity diameter / Średnia średnica ilościowa	[μm]	D_n	260.3	207.5	198.7
Average surface diameter / Średnia średnica powierzchniowa	[μm]	D_s	313.1	244.7	233.3
Average volume diameter / Średnia średnica objętościowa	[μm]	D_v	358.9	276.9	262.5
Average Sauter's mean diameter / Średnia średnica Sautera	[μm]	SMD	471.7	354.7	332.1
90% surface diameter / Średnica powierzchniowa 90%	[μm]	$D_{s0,9}$	745.5	542.5	498.5
90% volume diameter / Średnica objętościowa 90%	[μm]	$D_{v0,9}$	844.5	614.0	553.5
Supply pressure of the nozzle (average) / Ciśnienie zasilania dyszy (średnia)	[MPa]	p	0.197	0.398	0.600
Standard deviation of pressure measurement / Odchylenie standardowe pomiaru ciśnienia	[MPa]	δp	0.001	0.001	0.001

Nozzle performance (average) / Wydajność dyszy (średnia)	[dm ³ /h]	Q	272.29	382.36	468.92
Standard deviation of pressure measurement / Odchylenie standardowe pomiaru ciśnienia	[dm ³ /h]	δQ	0.74	0.83	0.49
Spray angle / Kąt rozpylenia	[°]	α	60	61	64
Maximum spraying density / Kąt rozpylenia	[g/(s · m ²)]	q _{max}	201.28	274.00	493.80
Minimum spraying density / Minimalna gęstość zraszania	[g/(s · m ²)]	q _{mini}	3.64	2.77	5.59
Average spraying density / Średnia gęstość zraszania	[g/(s · m ²)]	q _{eq}	82.00	91.27	136.22
Distribution irregularity of spraying density / Nierównomierność rozkładu gęstości zraszania	[%]	I	241.03	297.18	358.41

Source: Own elaboration.
Źródło: Opracowanie własne.

The TF6 V nozzle – compared to the other tested TF 6 FCN spiral nozzle – despite similar flow parameters, is characterized by much smaller droplet fragmentation in the stream and greater dispersion irregularity. It is also much more susceptible to changes in supply pressure – as evidenced by the resulting differences in spray angle values, spray density distributions and stream microstructure parameters. Differences become apparent especially at the low supply pressure of the nozzle of 0.2 MPa. Both the macro- and micro-structural parameters of the TF 6 V nozzle (with a hollow spraying cone) are very similar to the results obtained for the TF 6 NN nozzle presented in the paper [27]. The TF 6 NN nozzle is classified by the manufacturer as a full cone spray nozzle [35]. Based on the conducted tests, it can be considered to be more similar to the TF 6 V nozzle (with a hollow spraying cone) than the TF 6 FCN nozzle (with a full cone) in terms of the parameters.

Dysza TF6 V – w porównaniu z drugą badaną dyszą spiralną TF 6 FCN – pomimo zbliżonych parametrów przepływowych, cechuje się znacznie mniejszym rozdrobnieniem kropelek w strumieniu i większą nierównomiernością dyspersji. Jest też znacznie bardziej podatna na zmiany ciśnienia zasilania – o czym świadczą otrzymane różnice w wartościach kąta rozpylenia i rozkłady gęstości zraszania oraz parametry mikrostruktury strumienia. Różnice uwidaczniają się zwłaszcza przy niskim ciśnieniu zasilania dyszy wynoszącym 0,2 MPa. Zarówno parametry makro-, jak i mikrostrukturalne dyszy TF 6 V (o pustym stożku zraszania) są bardzo zbliżone do wyników uzyskanych dla dyszy TF 6 NN przedstawionych w pracy [27]. Dysza TF 6 NN jest klasyfikowana przez producenta jako dysza o pełnym stożku zraszania [35]. Na podstawie przeprowadzonych badań można uznać, że jest ona pod względem parametrów bardziej zbliżona do dyszy TF 6 V (o pustym stożku zraszania) niż TF 6 FCN (o stożku pełnym).

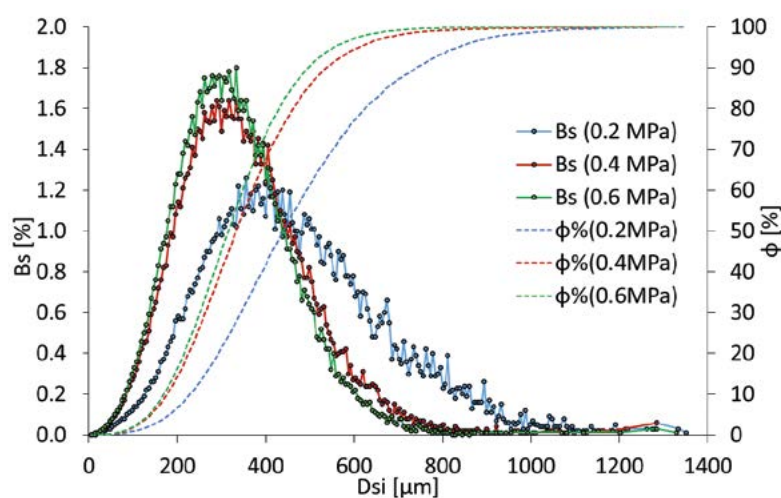


Figure 7. Spray spectrum for TF 6 V nozzle
Rycina 7. Widmo rozpylenia dla dyszy TF 6 V

Source: Own elaboration.
Źródło: Opracowanie własne.

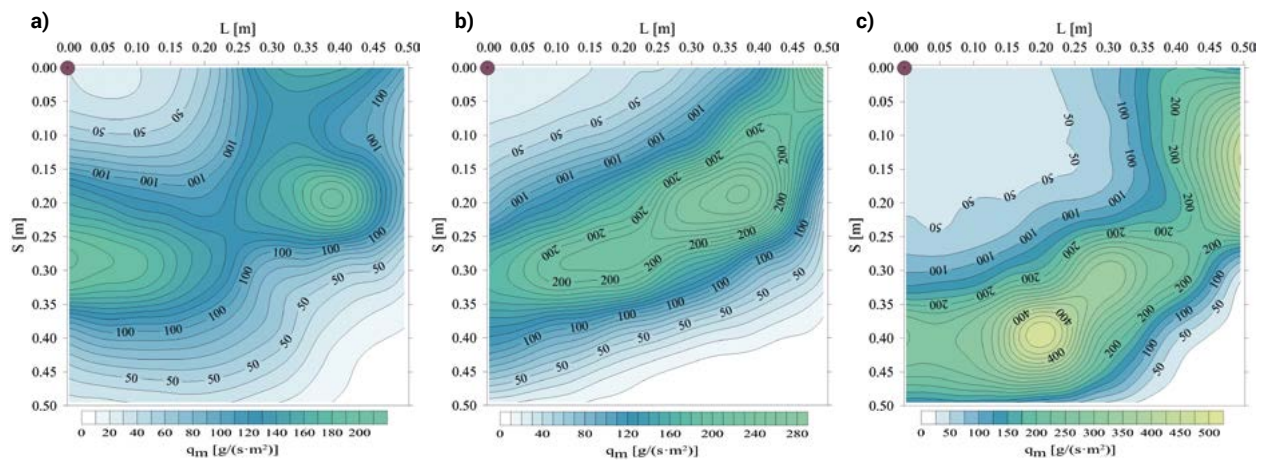


Figure 8. Distribution of mass spraying density of TF 6 V nozzle at supply pressure: a) 0.2 MPa, b) 0.4 MPa, c) 0.6 MPa
Rycina 8. Rozkład masy gęstości zraszania dyszy TF 6 V przy ciśnieniu zasilania: a) 0,2 MPa, b) 0,4 MPa, c) 0,6 MPa

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

The distribution of spray density of the TF6 V nozzle is characterized by a near-ring shape. The increase in supply pressure causes a slight change in the diameter of the spray ring and increases the amount of water fed into it. Nevertheless, the width of the main spray rings themselves is comparable for all the conducted trials. Despite the generally high irregularity of the TF 6 V nozzle, it is particularly noteworthy that in the spray ring itself the stream has a very uniform and symmetrical distribution. It provides for the possibility of using the TF 6 V nozzle, among others, in plant irrigation systems, especially those working on the move. Moreover, the marked change in spray density with increasing pressure can be used in these systems as a simple method of regulating the intensity of irrigation. Due to the small spray angle, fairly low dispersion and small amount of water applied directly under the nozzle, its use in firefighting or neutralization systems should be considered inappropriate.

Rozkłady gęstości zraszania dyszy TF6 V cechują się kształtem zbliżonym do pierścieniowego. Wzrost ciśnienia zasilania powoduje niewielką zmianę średnicy pierścienia zraszania i zwiększenie ilości podawanej w nim wody. Niemniej jednak sama szerokość głównych pierścieni zraszania jest porównywalna dla wszystkich przeprowadzonych prób. Pomimo ogólnie dużej nierównomierności zraszania dyszy TF 6 V, na szczególną uwagę zasługuje fakt, iż w samym pierścieniu zraszania strumień charakteryzuje się bardzo równomiernym i symetrycznym rozkładem. Daje do możliwości zastosowania dyszy TF 6 V m.in. w układach nawadniania roślin, zwłaszcza tych pracujących w ruchu. Ponadto wyraźna zmiana gęstości zraszania przy wzroście ciśnienia może być w tych systemach wykorzystana jako prosta metoda regulacji intensywności nawadniania. Z racji małego kąta zraszania, dość małej dyspersji i małej ilości wody podawanej bezpośrednio pod dyszą jej stosowanie w systemach gaśniczych, czy neutralizacyjnych należy uznać za niewłaściwe.

Table 3. Test results for NF 15 nozzle

Tabela 3. Wyniki badań dla dyszy NF 15

Parameter / Parametr	Unit / Jednostka	Symbol / Symbol	Supply pressure of the nozzle / Ciśnienie zasilania dyszy		
			0.2 MPa	0.4 MPa	0.6 MPa
Number of counted droplets / Liczba zliczonych kropeł	[pcs.] / [szt.]	N	279,173	301,374	382,674
Measurement time of microstructure parameters / Czas pomiaru parametrów mikrostruktury	[sec.] / [sek.]	t	180	180	180
Average quantity diameter / Średnia średnica ilościowa	[μm]	Dn	392	429.7	538.4
Average surface diameter / Średnia średnica powierzchniowa	[μm]	Ds	476.8	526.1	646
Average volume diameter / Średnia średnica objętościowa	[μm]	Dv	550.8	609.3	733.4

Average Sauter's mean diameter / Średnia średnica Sautera	[μm]	SMD	735.2	817.2	945
90% surface diameter / Średnica powierzchniowa 90%	[μm]	$D_{90,9}$	1,120.0	1,513.5	1,617.0
90% volume diameter / Średnica objętościowa 90%	[μm]	$D_{V9,9}$	1,327.0	18,03.5	18,97.0
Supply pressure of the nozzle (average) / Ciśnienie zasilania dyszy (średnia)	[MPa]	p	0.201	0.396	0.600
Standard deviation of pressure measurement / Odchylenie standardowe pomiaru ciśnienia	[MPa]	δp	0.001	0.001	0.001
Nozzle performance (average) / Wydajność dyszy (średnia)	[dm^3/h]	Q	260.087	413.50	508.13
Standard deviation of pressure measurement / Odchylenie standardowe pomiaru ciśnienia	[dm^3/h]	δQ	0.42	0.27	0.42
Spray angle / Kąt rozpylenia	[°]	α	65	65	65
Maximum spraying density / Kąt rozpylenia	[$\text{g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$]	q_{max}	786.550	1,385.61	2,758.180
Minimum spraying density / Minimalna gęstość zraszania	[$\text{g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$]	q_{mini}	0.43	0.16	0.76
Average spraying density / Średnia gęstość zraszania	[$\text{g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$]	q_{eq}	87.54	174.8381	304.49
Distribution irregularity of spraying density / Nierównomierność rozkładu gęstości zraszania	[%]	I	898	792	906

Source: Own elaboration.
Źródło: Opracowanie własne.

Test results of the NF 15 nozzle confirm that it generates a very flat water stream with a narrow spray band and a stable spray angle. All microstructural parameters indicate very low dispersion and do not allow to qualify this nozzle as a fog nozzle. With regard to water dispersion through the NF 15 nozzle, it is noteworthy that it shows deterioration of microstructure parameters with increasing supply pressure. This is due to an increase in the concentration of droplets in the outflowing stream. This phenomenon is not suitable for spraying liquids. This was confirmed in a scientific publication [27]. Furthermore, during the tests, the measuring probe of the AWK analyser is located relatively close to the nozzle outlet, which makes it impossible to achieve the appropriate path (length) of the distribution of the water stream quickly flowing out of the nozzle. A continuous stream of liquid begins to break up into droplets only at a certain distance from the nozzle, which is commonly referred to as the required breakup length [30]. In addition, as the distance from the nozzle outlet increases, the kinetic energy of the stream decreases. This is an effect related to the size of the diameters of the produced droplets [50].

Wyniki badań dyszy NF 15 potwierdzają, że generuje ona bardzo płaski strumień wody o wąskim pasie zraszania i stabilnym kącie rozpylenia. Wszystkie parametry mikrostrukturalne świadczą o bardzo małej dyspersji i nie pozwalają na zakwalifikowanie tej dyszy jako dyszy mgłowej. W odniesieniu do rozpylania wody przez dyszę NF 15 na uwagę zasługuje fakt, że wykazuje ona pogorszenie parametrów mikrostruktury przy wzrastającym ciśnieniu zasilania. Jest to spowodowane zwiększeniem koncentracji kropelek w wypływającej strudze. Zjawisko to nie sprzyja rozpylaniu cieczy. Zostało to potwierdzone w publikacji naukowej [27]. Ponadto w czasie badań sonda pomiarowa analizatora AWK znajduje się stosunkowo blisko wylotu dyszy, co uniemożliwia osiągnięcie odpowiedniej drogi (długości) rozpadu strugi wody szybko wypływającej z dyszy. Ciągły strumień cieczy zaczyna się rozpadać na krople dopiero w pewnej odległości od dyszy, co jest powszechnie określane jako wymagana długość rozpadu [30]. Ponadto wraz ze wzrostem odległości od wylotu dyszy maleje energia kinetyczna strugi. Jest to efekt związany z wielkością średnic wytwarzanych kropelek [50].

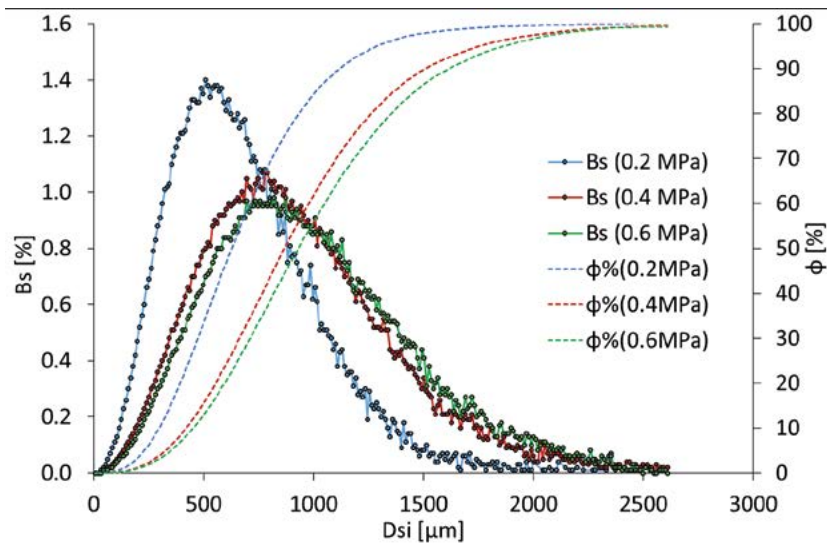


Figure 9. Spray spectrum for NF 15 nozzle
Rycina 9. Widmo rozpylenia dla dyszy NF 15

Source: Own elaboration.
Źródło: Opracowanie własne.

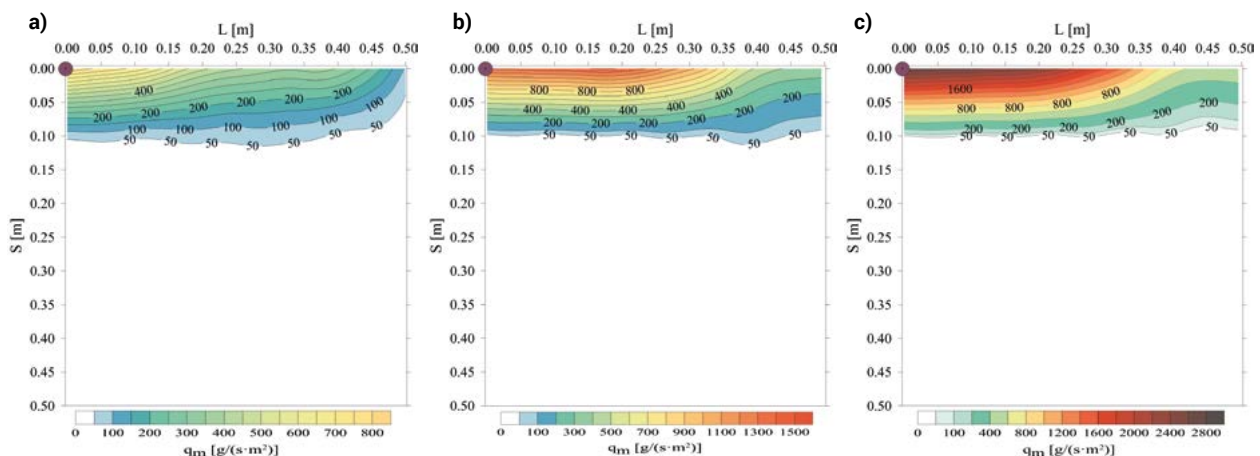


Figure 10. Distribution of the mass spray density of the NF 15 nozzle at a supply pressure of: a) 0.2 MPa, b) 0.4 MPa, c) 0.6 MPa
Rycina 10. Rozkład masowej gęstości zraszania dyszy NF 15 przy ciśnieniu zasilania: a) 0,2 MPa, b) 0,4 MPa, c) 0,6 MPa

Source: Own elaboration.
Źródło: Opracowanie własne.

What is noteworthy about the mass density distribution is that regardless of the supply pressure values of the NF 15 nozzle, its spraying area almost does not change. This results in a situation where an increase in the supply pressure of the nozzle, and thus its capacity, significantly changes the value of the maximum spraying density. Between a pressure of 0.2 MPa and 0.6 MPa, the value of this parameter changes more than 3.5 times. The parameter of spray irregularity of the NF 15 nozzle takes on very large values. This is due to the fact that the nozzle feeds the stream in a well-defined zone, while the remaining measurement space remains unsprayed. In such cases, the I parameter is unreliable in assessing the uniformity of spraying, as confirmed by the results obtained for different supply pressures of the NF 15 nozzle.

Potential applications for NF 15 nozzles could be water barrier systems that limit the spread and penetration of hazardous

W rozkładach masowej gęstości zraszania na uwagę zasługuje fakt, że bez względu na wartości ciśnienia zasilania dyszy NF 15 jej powierzchnia zraszania niemal się nie zmienia. Powoduje to sytuację, w której wzrost ciśnienia zasilania dyszy, a tym samym jej wydajności, znacząco zmienia wartość maksymalnej gęstości zraszania. Pomiedzy ciśnieniem 0,2 MP a 0,6 MPa wartość tego parametru zmienia się ponad 3,5 razy. Parametr nierównomierności zraszania dyszy NF 15 przyjmuje bardzo duże wartości. Jest to spowodowane tym, że dysza podaje strugę w ściśle określonej strefie, a pozostała przestrzeń pomiarowa pozostaje niezraszana. W takich przypadkach parametr I jest niemiernodajny w ocenie równomierności zraszania, co potwierdzają wyniki uzyskane dla różnych ciśnień zasilania dyszy NF 15.

Potencjalnym zastosowaniem dysz NF 15 mogą być systemy barier wodnych ograniczających rozprzestrzenianie i przenikanie

substances or dust. Due to the small volume of the produced stream and the large value of droplet diameters, this nozzle cannot operate volumetrically. This nozzle can be used in cooling systems based on dripping water stream, which, among other things, are used to protect tanks with petroleum liquids. The even distribution of the stream in the spray lane and the simple possibility of changing the concentration of the amount of cooling liquid in this case are undoubted advantages of the NF 15 nozzle.

substancji niebezpiecznych lub pyłów. Dysza ta z racji małej kubatury wytwarzanego strumienia i dużej wartości średnic kropelek nie może działać objętościowo. Może być ona także wykorzystywana w systemach chłodzenia opartych na ociekającym strumieniu wody, które m.in. są stosowane do ochrony zbiorników z cieczami ropopochodnymi. Równomierny rozkład strugi w pasie zraszania i prosta możliwość zmiany koncentracji ilości cieczy chłodniczej są w tym przypadku niewątpliwym atutem dyszy NF 15.

Table 4. Test results for CW 50 nozzle
Tabela 4. Wyniki badań dla dyszy CW50

Parameter / Parametr	Unit / Jednostka	Symbol / Symbol	Supply pressure of the nozzle / Ciśnienie zasilania dyszy		
			0.2 MPa	0.4 MPa	0.6 MPa
Number of counted droplets / Liczba zliczonych kropelek	[pcs.] / [szt.]	N	86,541	130,927	173,735
Measurement time of microstructure parameters / Czas pomiaru parametrów mikrostruktury	[sec.] / [sek.]	t	180	180	180
Average quantity diameter / Średnia średnica ilościowa	[μm]	D _n	160.3	162.6	157.3
Average surface diameter / Średnia średnica powierzchniowa	[μm]	D _s	194.2	193.7	186.8
Average volume diameter / Średnia średnica objętościowa	[μm]	D _v	228.1	222.5	213.8
Average Sauter's mean diameter / Średnia średnica Sautera	[μm]	SMD	314.9	293.6	280.2
90% surface diameter / Średnica powierzchniowa 90%	[μm]	D _{90,s}	556.5	475.0	445.5
90% volume diameter / Średnica objętościowa 90%	[μm]	D _{90,v}	697.5	550.5	520.5
Supply pressure of the nozzle (average) / Ciśnienie zasilania dyszy (średnia)	[MPa]	p	0.199	0.402	0.603
Standard deviation of pressure measurement / Odchylenie standardowe pomiaru ciśnienia	[MPa]	δp	0.001	0.001	0.002
Nozzle performance (average) / Wydajność dyszy (średnia)	[dm ³ /h]	Q	99.87	130.84	165.27
Standard deviation of pressure measurement / Odchylenie standardowe pomiaru ciśnienia	[dm ³ /h]	δQ	0.26	0.02	0.35
Spray angle / Kąt rozpylenia	[°]	α	79.0	80.0	80.0
Maximum spraying density / Kąt rozpylenia	[g/(s · m ²)]	q _{max}	45.64	92.93	82.47
Minimum spraying density / Minimalna gęstość zraszania	[g/(s · m ²)]	q _{mini}	0.67	1.21	2.09
Average spraying density / Średnia gęstość zraszania	[g/(s · m ²)]	q _{eq}	21.20	34.95	33.35
Distribution irregularity of spraying density / Nierównomierność rozkładu gęstości zraszania	[%]	I	212.08	262.46	241.06

Source: Own elaboration.
Źródło: Opracowanie własne.

The results of the CW 50 nozzle show exceptional stability regardless of the water supply pressure. The only exceptions to this are the performance and maximum spray density parameters. The CW 50 nozzle generates small droplets with an even distribution. Its stream can be classified as a third class of water mist according to NFPA 750. The CW 50 nozzle exhibits low values of mass spray density, making it suitable only for use in mist extinguishing systems.

Wyniki badań dyszy CW 50 cechują się wyjątkową stabilnością niezależnie od ciśnienia zasilania wodą. Wyjątek stanowią tu jedynie parametry wydajności i maksymalnej gęstości zraszania. Dysza CW 50 generuje małe krople o równomiernym rozkładzie. Można jej strumień zaklasyfikować do trzeciej klasy mgły wodnej zgodnie z NFPA 750. Dysza CW 50 wykazuje małe wartości masowej gęstości zraszania, co sprawia, że może być ona stosowana jedynie w systemach gaśniczych mgłowych.

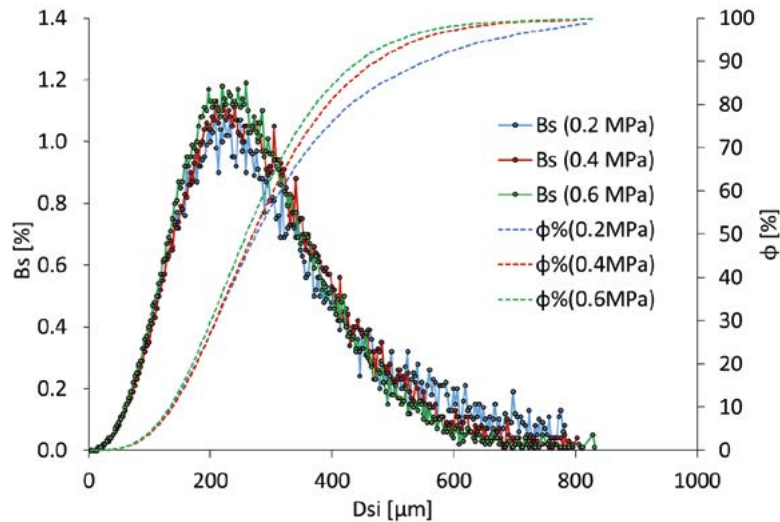


Figure 11. Spray spectrum for CW 50 nozzle
Rycina 11. Widmo rozpylenia dla dyszy CW 50

Source: Own elaboration.
Źródło: Opracowanie własne.

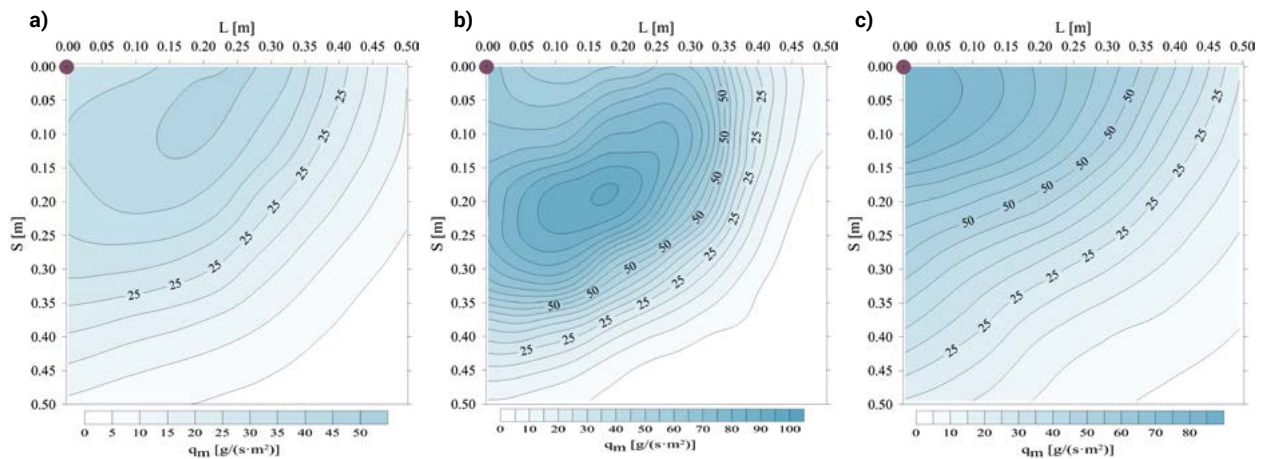


Figure 12. Distribution of the mass spray density of the CW 50 nozzle at a supply pressure of: a) 0.2 MPa, b) 0.4 MPa, c) 0.6 MPa
Rycina 12. Rozkład masowej gęstości zraszania dyszy CW 50 przy ciśnieniu zasilania: a) 0,2 MPa, b) 0,4 MPa, c) 0,6 MPa

Source: Own elaboration.
Źródło: Opracowanie własne.

The uniform distribution of spray density, which is highly symmetrical with respect to the axis of stream application, is a great advantage of the nozzle under study in the context of applications in crop spraying systems, among others. The possibility of

Równomierne rozkłady gęstości zraszania, bardzo symetryczne względem osi podania strumienia, są dużą zaletą badanej dyszy w kontekście zastosowań między innymi w układach oprysku roślin. Możliwość zastosowania dyszy CW 50 w takim systemie

using the CW 50 nozzle in such a system is confirmed by the large spray angle and low variability of spray parameters as a function of supply pressure. The CW 50 nozzle, because of its good stream dispersion, can also be used in systems for cleaning the air of hazardous gaseous substances and dust. Unfortunately, the limitation in this case may be the low efficiency of the product under test, which is not conducive to the effectiveness of the processes to which it would be applied. This has been confirmed in studies described in [40], among others.

Conclusion

The test results presented in the article make it possible to determine the potential applications of water nozzles of various types. Based on the evaluation of the micro- and macro-structural parameters produced by the tested nozzles, their advantages and limitations were indicated. The analysis of the test results was directed at determining the possibility of using the type of nozzles mainly in firefighting systems and in the elimination of hazardous substance vapours and dust. The wide range of research presented in the paper and the analysis of other publications on the subject also make it possible to select the design features of a nozzle that are particularly desirable in a given area of application. Moreover, of great value in the work is the evaluation of the effect of the supply pressure of nozzles of different types on the parameters of the streams they generate.

Among the main conclusions of the study are the following:

1. The TF6 FCN and CW 50 nozzles produce a stream that can be classified as an extinguishing mist stream. This provides an opportunity for the potential use of these products in low-pressure mist systems.
2. The compact and homogeneous stream produced by NF 15 nozzles can be a great asset when used in water barrier systems or in spray extinguishing systems with horizontal supply.
3. The CW 50 nozzle can be used in spraying and irrigation systems used in agriculture because of the high uniformity of the stream.
4. The obtained values of spraying density for spiral nozzles and CW 50 do not guarantee proper performance when extinguishing larger fires of solid bodies.
5. The TF 6 FCN and CW 50 nozzles, due to the production of a stream with: large spray angle, high dispersion and uniformity of spray, are likely to be effective in the processes of removing gaseous hazardous substances and dust. However, in case of the CW 50 nozzle, the problem may be its low capacity, which is very important in these processes.
6. Spiral nozzles feed water into the spray ring zone. The amount of water applied directly under the nozzles is small. This applies to spiral nozzles with both hollow and full spray cones.
7. The study proves that in the range of supply pressures of 0.2–0.6 MPa, the nozzles used in the experiment either show no change in spray angle and spray area at all, or

potwierdzają duży kąt rozpylania i małą zmienność parametrów strugi w funkcji ciśnienia zasilania.

Dysza CW 50, z racji dobrej dyspersji strumienia, może być również wykorzystana w systemach oczyszczania powietrza z niebezpiecznych substancji gazowych i pyłów. Niestety ograniczeniem może być w tym przypadku mała wydajność badanego wyrobu, która nie sprzyja skuteczności procesów, do których miałyby być zastosowana. Potwierdzono to m.in. w badaniach opisanych w [40].

Wnioski

Przetawione w artykule wyniki badań umożliwiają określenie potencjalnych zastosowań dysz wodnych różnego typu. Na podstawie oceny wytwarzanych przez badane dysze parametrów mikro- i makrostrukturalnych wskazano ich zalety i ograniczenia. Przeprowadzona analiza wyników badań została ukierunkowana na określenie możliwości stosowania danego typu dysz głównie w systemach gaśniczych oraz przy likwidacji par substancji niebezpiecznych i pyłów. Szeroki zakres badań przedstawianych w pracy oraz analiza innych publikacji z tej tematyki pozwalają również na wytypowanie cech konstrukcyjnych dyszy szczególnie pożądanych w danym obszarze zastosowań. Ponadto dużą wartość w pracy stanowi ocena wpływu ciśnienia zasilania dysz różnego typu na parametry generowanych przez nie strumieni.

Wśród głównych wniosków z przeprowadzonych badań można wskazać następujące:

1. Dysze TF6 FCN oraz CW 50 wytwarzają strumień, który można zaklasyfikować jako gaśniczy strumień mgłowy. Daje to możliwość potencjalnego zastosowania tych wyrobów w niskociśnieniowych systemach mgłowych.
2. Zwarta i jednorodna struga wytwarzana przez dysze NF 15 może być dużym atutem przy zastosowaniu w układach barier wodnych lub w zraszających systemach gaśniczych z podawaniem horyzontalnym.
3. Dysza CW 50 z racji dużej jednorodności strumienia może znaleźć zastosowanie w systemach opryskowych i nawadniających używanych w rolnictwie.
4. Otrzymane wartości gęstości zraszania dla dysz spiralnych oraz CW 50 nie gwarantują właściwego działania podczas gaszenia większych pożarów ciał stałych.
5. Dysze TF 6 FCN oraz CW 50 z racji wytwarzania strumienia o: dużym kącie rozpylenia, dużej dyspersji i równomierności zraszania, prawdopodobnie będą skuteczne w procesach usuwania gazowych substancji niebezpiecznych i pyłów. W przypadku dyszy CW 50 problemem może być jednak jej mała wydajność, która w tych procesach jest bardzo istotna.
6. Dysze spiralne podają wodę w strefę pierścienia zraszania. Ilość wody podawana bezpośrednio pod dysze jest mała. Dotyczy to dysz spiralnych zarówno o pustych, jak i o pełnych stożkach zraszania.
7. Badania dowodzą, że w przedziale ciśnień zasilania 0,2–0,6 MPa dysze użyte w eksperymencie albo w ogóle nie wykazują zmiany kąta rozpylenia i powierzchni

the identified changes in this range are insignificant. This makes the work of determining the correct placement of these nozzles in piping systems easier.

8. It can be concluded that the change in supply pressure (within the analysed range) has little effect on the stream generated by the nozzles with full spray cones (TF 6 FCN or CW 50).
9. The parameter I of spray irregularity may be unreliable in evaluating the flat-formed streams found in the NF 15 nozzle. In addition, it can give misleading results, especially when part of the analysed area is not sprayed.

Further work should be directed mainly to the development of mathematical models of the processes in question, as well as laboratory tests performed on a small and large scale that would confirm the applicability of the nozzles under study in a given device or system. Moreover, the scope of the research should be expanded to include more nozzles that differ in design features and parameters. However, in order to do so, it is necessary to look for nozzles that have the characteristics desired for a given application, and exclude those that do not. This is the categorization indicated in this article.

zraszania, albo zidentyfikowane zmiany w tym zakresie są nieznaczne. Ułatwia to prace związane z określeniem prawidłowego rozmieszczenia tych dysz w systemach rurowych.

8. Można stwierdzić, że zmiana ciśnienia zasilania (w analizowanym zakresie) ma mały wpływ na strumień generowany przez dysze o pełnych stożkach zraszania (TF 6 FCN czy CW 50).
9. Parametr nierównomierności zraszania I może być niemiarodajny w ocenie strumieni o płaskiej formie, jaki występuje w dyszy NF 15. Ponadto może on dawać mylące wyniki, zwłaszcza w przypadku gdy część analizowanego obszaru nie jest zraszana.

Dalsze prace należy ukierunkować głównie na opracowanie modeli matematycznych danych procesów, jak również badania laboratoryjne wykonywane w małej i dużej skali, które potwierdziłyby możliwości zastosowania badanych dysz w danym urządzeniu lub systemie. Ponadto zakres badań należy rozszerzyć o większą liczbę dysz różniących się cechami konstrukcyjnymi i parametrami. W tym celu należy jednak poszukiwać dysz charakteryzujących się pożądanymi do danego zastosowania cechami, a wykluczyć te, które ich nie posiadają. Taką kategoryzację wskazano w niniejszej pracy.

Literature / Literatura

- [1] Orzechowski Z., Prywer J. *Wytwarzanie i zastosowanie rozpylonej cieczy*, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2018.
- [2] Roguski J., Zbrożek P., Czerwieńko D., *Wybrane aspekty stosowania w obiektach budowlanych urządzeń gaśniczych na mgłę wodną*, Wydawnictwo CNBOP-PIB, Józefów 2012.
- [3] Ilari A., Piancatelli S., Centorame L., Moumni M., Romanazzi G., Foppa Pedretti E., *Distribution quality of agrochemicals for the revamping of a sprayer system based on lidar technology and grapevine disease management*, "Applied Sciences", 2023, 13(4):2222, <https://doi.org/10.3390/app13042222>.
- [4] Fessler L., Pietsch G., Wright W., Zhu H., Xiaocun S., Fulcher A., *Characterizing spray deposits from variable- and constant-rate spray technologies: Implications for future optimization to target trunk and foliar pests*, XXXI Międzynarodowy Kongres Ogrodniczy, 2023, 1360, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1360.34>.
- [5] Jiang Y., Yang Z., Xu, X., Shen D., Jiang T., Xie B., Duan J., *Wetting and deposition characteristics of air-assisted spray droplet on large broad-leaved crop canopy*, "Frontiers in Plant Science" 2023, 14, <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1079703>.
- [6] Moon S., Li T., Sato K., Yokohata H., *Governing parameters and dynamics of turbulent spray atomization from modern GDI injectors*, "Energy" 2017, 127, 89–100, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.099>.
- [7] Huang W., Gong H., Pratama R. H., Moon S., Takagi K., Chen Z., *Potential for shock-wave generation at diesel engine conditions and its influence on spray characteristics*, "Energies" 2020, 13(23), 6465, <https://doi.org/10.3390/en13236465>.
- [8] Gałą J., Wójcik B., *Assessment of the impact of extinguishing with a low-pressure fog lance on a fire environment*, "Sustainability" 2022, 14(11), 6731, <https://doi.org/10.3390/su14116731>.
- [9] Drzymała T., Gałą J., Wójcik M., *Analiza wpływu wydatku i ustawienia głowicy prądownicy TurboJet 52 na rozkład intensywności zraszania w strumieniu rozpylonym*, „Zeszyty Naukowe SGSP” 2017, 61, 151–169.
- [10] Gui X., Xue H., Hu Z., Cui Z., *Influence of water mist nozzle characteristic parameters on oil pool fire extinguishing in confined space*, "Arabian Journal for Science and Engineering" 2023, 48(3), 3441–3454, <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07162-0>.
- [11] Bara A., Dusserre G., *The use of water curtains to protect firemen in case of heavy gas dispersion*, "Journal of Loss Prevention in the Process Industries" 1997, 10(3), 179–183, [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(96\)00049-6](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(96)00049-6).
- [12] Cui Y., Liu J., *Research progress of water mist fire extinguishing technology and its application in battery fires*, "Process Safety and Environmental Protection" 2021, 149, 559–574, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.03.003>.
- [13] Buchlin, J.-M., *Mitigation of industrial hazards by water spray curtains*, "Journal of Loss Prevention in the Process Industries" 2017, Part A, 50, 91–100, <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.08.007>.

- [14] Węsierski T., Majder-Łopátka M., Wąsik W., *Study of water curtain effectiveness to fight against vapours of methyl acetate during uncontrolled release*, "MATEC Web of Conferences FESE 2018" 2018, 247, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824700050>.
- [15] Węsierski, T., Majder-Łopátka M., *Comparison of water curtain effectiveness in the elimination of airborne vapours of ammonia, acetone, and low-molecular aliphatic alcohols*, "Applied Sciences" 2018, 8(10), <https://doi.org/10.3390/app8101971>.
- [16] Cheng Ch., Tan W., Du H., Liu L., *A modified steady-state model for evaluation of ammonia concentrations behind a water curtain*, "Journal of Loss Prevention in the Process Industries" 2015, 36, 120–124, <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.05.018>.
- [17] Węsierski T., Majder-Łopátka M., Wąsik W., *Control of ammonia space contaminations by using turbine fire-fighting vehicles*, "Przemysł Chemiczny" 2017, 1(5), 145–149, <https://doi.org/10.15199/62.2017.5.21>.
- [18] Fedoruk M.J., Bronstein R., Kerger B.D., *Ammonia exposure and hazard assessment for selected household cleaning product uses*, "J. Expo. Anal. Sci. Environ. Epidemiol." 2005, 15(6), 534–544, <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500431>.
- [19] Zhang J., Liang P., Liu Y., *Impingement and breakup characteristics of free opposed impinging jets with unequal nozzle diameter*, "Experimental Thermal and Fluid Science" 2023, 145, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2023.110884>.
- [20] Shen X., Zhang J., Hua M., Pan X., *Experimental research on decontamination effect of water curtain containing compound organic acids on the leakage of ammonia*, "Process Safety and Environmental Protection" 2017, 105, 250–261, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.10.016>.
- [21] Fedak W., Ulbrich R., Ligus G., Wasilewski M., Kołodziej S., Wasilewska B., Ochowiak M., Włodarczak S., Krupińska A., Pawlenko I., *Influence of Spray Nozzle Operating Parameters on the Fogging Process Implemented to Prevent the Spread of SARS-CoV-2 Virus*, "Energie" 2021, 14(14), 4280, <https://doi.org/10.3390/en14144280>.
- [22] Ochowiak M., Krupińska A., Włodarczak S., Matuszak M., Woziwodzki S., Szulc T., *Analysis of the possibility of disinfecting surfaces using portable foggers in the era of the SARS-CoV-2 epidemic*, "Energies" 2021, 14(7), <https://doi.org/10.3390/en1407201>.
- [23] Ochowiak M., Włodarczak S., Krupinska A., Matuszak M., Fedak, W., Ligus G., Kołodziej S., Wasilewska B., *Spray curtains as devices for surface spraying during the SARS-CoV-2 pandemic*, "Environ. Res." 2022, 206, 112562, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112562>.
- [24] Zbrożek P., Prasula J., *Wpływ wielkości średnic kropli mgły wodnej na efektywność tłumienia pożarów i chłodzenie*, BiTP Vol. 15 Issue 3, 2009, pp. 113–148, <https://panel.sft.cnbop.pl/storage/46730e51-ab6c-4e41-83c8-e82249dbce2f>.
- [25] Orzechowski Z., Prywer J., *Wytwarzanie i zastosowanie rozpylonej cieczy*, w Wydanie I, WNT, Warszawa 2008.
- [26] Ochowiak M., Krupińska A., Włodarczak S., Matuszak M., Markowska M., Janczarek M., Szulc T., *The two-phase conical swirl atomizers: Spray characteristics*, „Energies” 2020, 13(13), 3416, <https://doi.org/10.3390/en13133416>.
- [27] Wąsik W., Rogula-Kozłowska W., Majder-Łopátka M., *Ocena mikrostruktury strumienia wytwarzanego przez dyszę spiralną o pełnym stożku zraszania* "Zeszyty Naukowe SGSP" 2021, 79, 105–122.
- [28] Wąsik W., Walczak A., Węsierski T., *The impact of fog nozzle type on the distribution of mass spray density*, "MATEC Web of Conferences FESE" 2018, 247, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824700058>.
- [29] Birouk M., Lekic N., *Liquid jet breakup in quiescent atmosphere*, "Atomization and Sprays" 2009, 19(6), 501–528, <https://doi.org/10.1615/atomizspr.v19.i6.20>.
- [30] Qian S., Zhu D. Z., Xu H., *Splashing generation by water jet impinging on a horizontal plate*, "Experimental Thermal and Fluid Science" 2022, 130, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2021.110518>.
- [31] Majder-Łopátka M., Węsierski T., Wąsik W., Binio Ł., *Effects of the Supply Pressure in a Spiral Vortex Nozzle on a Dispersion Angle and the Sprinkling Density of Water Jet*, "Zeszyty Naukowe SGSP" 2017, 61, 137–151.
- [32] Hua M., Qi M., Yue, T.-T., Pi X.-Y., Pan X.-H., Jiang J.-C., *Experimental Research on Water Curtain Scavenging Ammonia Dispersion in Confined Space*, "Procedia Eng." 2018, 211, 256–261, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.011>.
- [33] Instrukcja obsługi Analiza Widma Kropel IPS, Zakład Elektronicznej Aparatury Pomiarowej Firma KAMIKA Instruments Sp. z o.o., Warszawa 2009.
- [34] Wąsik W., Majder-Łopátka M., Rogula-Kozłowska W., *Influence of micro- and macrostructure of atomized water jets on ammonia absorption efficiency*, "Sustainability" 2022, 14, 9693, <https://doi.org/10.3390/su14159693>.
- [35] BETE Europe GmbH, Catalog card nozzles TF 2023, <https://www.bete-dysze.pl/files/bete-duesen-de/pdf/vollkegel/tf.pdf> [dostęp: 01.01.2023].
- [36] BETE Europe GmbH, Catalog card nozzles TF 2023, <https://www.bete-dysze.pl/files/bete-duesen-de/pdf/hohlkegel/tf.pdf> [dostęp: 01.04.2023].
- [37] BETE Europe GmbH, Catalog card nozzles NF 2023, <https://www.bete-dysze.pl/files/bete-duesen-de/pdf/flachstrahl/nf.pdf> [dostęp: 01.04.2023].
- [38] BETE Europe GmbH, Catalog card nozzles CW 2023, <https://www.bete-dysze.pl/files/bete-duesen-de/pdf/vollkegel/cw.pdf> [dostęp: 01.04.2023].
- [39] Węsierski T., *Effectiveness of water curtains during fighting against vapors of saturated linear low molecular mass alcohols during its uncontrolled release*, "Przemysł Chemiczny" 2015, 5, 728–730, <https://doi.org/10.15199/62.2015.5.13>.
- [40] Majder-Łopátka M., Węsierski T., Wąsik W., *Wpływ typu dyszy rozpylającej na skuteczność absorpcji obłoku amoniaku powstałego w wyniku awarii przemysłowej* BiTP Vol. 42 Issue 2, 2016, pp. 127–134, <https://doi.org/10.12845/bitp.42.2.2016.13>.
- [41] Gałaj, J., Drzymała, T., Piątek P., *Analysis of influence of tilt angle on the distribution of water droplets diameters in a spray generated by the turbo master 52 nozzle*,

- "Procedia Engineering" 2017, 172, 300–309. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.118>.
- [42] Kraus-Namroży N., Brzezińska D., *Effectiveness of swirl water mist nozzles for fire suppression*, "International Journal of Environmental Research and Public Health" 2022, 19(23), <https://doi.org/10.3390/ijerph192316328>.
- [43] Buchlin J.-M., *Thermal shielding by water spray curtain*, "Journal of Loss Prevention in the Process Industries" 2005, 18(4-6), 423–432, <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.06.039>.
- [44] Piatek P., Gałąż J., *Analysis of the influence of the spraying angle on the distribution of sprinkling intensity by a selected turbo water nozzle*, "MATEC Web of Conferences" 2018, 247, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824700008>.
- [45] Cote A.E., *Fire protection handbook*, National Fire Protection Association, Inc., Quincy, Massachusetts 2003.
- [46] PN-EN 12259-1:2005 Stałe urządzenia gaśnicze. Podzespoły urządzeń tryskaczowych i zraszaczowych – Część 1: Tryskacze.
- [47] PN-EN 12845:2008 Stałe urządzenia gaśnicze. Automataczne urządzenia tryskaczowe. Projektowanie, instalowanie i konserwacja.
- [48] PN-EN 14972-1:2021 Stałe urządzenia gaśnicze. Zestawy instalacji mgły wodnej – Część 1: Projektowanie, instalacja, przegląd i konserwacja.
- [49] NFPA 750 Standard on Water Mist Fire Protection Systems [Systemy gaśnicze na mgłę wodną], Standard Narodowego Stowarzyszenia Ochrony Przeciwożarowej, Quincy 2023.
- [50] Gai G., Hadjadj A., Kudriakov S., Mimouni S., Thomine O., *Numerical study of spray-induced turbulence using industrial fire-mitigation nozzles*, "Energies" 2021, 14(4), 1135, <https://doi.org/10.3390/en14041135>.

JUNIOR BRIG. WIKTOR WĄSIK, M.SC. ENG. – graduate of the Fire Safety Engineering Department of the Main School of Fire Service in Warsaw, where he received his engineering and master's degrees in 2007. From 2007 to 2011, an employee of the Scientific and Research Centre for Fire Protection-PIB as an inspector in the Laboratory of Fire Protection Units' Technical Equipment (BS). Since 2011, he has been employed at the Department of Rescue and Firefighting Equipment (Department of Fire Technology) at the Main School of Fire Service in Warsaw. He currently holds a lecturer position and teaches undergraduate courses in the subject of rescue and firefighting equipment. Author or co-author of research positions, participant in research projects and statutory work. His scientific achievements include publications in scientific and technical journals, speeches at scientific conferences and seminars. He is the co-inventor of several utility models and one patent. He is also a co-author of the university's script *Sprzęt ratowniczy i gaśniczy (Rescue and Fire Fighting Equipment)*. In his scientific research, he deals with the following topics: rescue and firefighting equipment and vehicles, fixed firefighting equipment, neutralization of hazardous substances, and water spraying. In 2018, he opened a doctoral dissertation on the impact of spray nozzle parameters on the process of removing ammonia released into the environment as a result of an accident.

ML. BRYG. MGR INŻ. WIKTOR WĄSIK – absolwent Wydziału Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie, w której w 2007 r. uzyskał tytuły inżyniera i magistra. W latach 2007–2011 pracownik Centrum Naukowo-Badawczego Ochrony Przeciwożarowej-PIB na stanowisku inspektora w Zespole Laboratoriów Technicznego Wyposażenia Straży Pożarnej i Technicznych Zabezpieczeń Przeciwożarowych (BS). Od 2011 r. zatrudniony w Zakładzie Sprzętu Ratowniczo-Gaśniczego (Katedra Techniki Pożarniczej) w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. Obecnie zajmuje stanowisko wykładowcy i prowadzi zajęcia dydaktyczne na studiach pierwszego stopnia z przedmiotu sprzęt ratowniczo-gaśniczy. Autor lub współautor stanowisk badawczych, uczestnik projektów badawczych i prac statutowych. W jego dorobku naukowym znajdują się publikacje w czasopismach naukowych i technicznych, wystąpienia na konferencjach i seminariach naukowych. Jest współtwórcą kilku wzorów użytkowych i jednego patentu. Jest również współautorem skryptu uczelnianego *Sprzęt ratowniczy i gaśniczy*. W prowadzonych badaniach naukowych zajmuje się tematyką: sprzętu ratowniczo-gaśniczego i pojazdów pożarniczych, stałych urządzeń gaśniczych, neutralizacji substancji niebezpiecznych, rozpylania wody. W 2018 r. otworzył przewod doktorski dotyczący wpływu parametrów dysz rozpylających na proces usuwania amoniaku uwolnionego do środowiska w wyniku awarii.