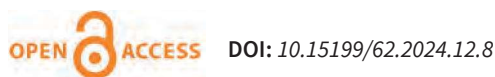


## Method of assessing the distribution of sprayed liquid using a laser Doppler analyzer

# Metoda oceny rozkładu rozpylonej cieczy za pomocą laserowego analizatora Dopplera



*The distribution of the vol. of sprayed liq. emitted by a pressure sprayer was assessed using point measurement of droplet diams. in bands of the sprayed liquid stream. The measurements were performed for various types of pressure sprayers at a station equipped with a Doppler laser anemometry analyzer. Based on the recorded droplet diams., the conventional vol. of liq. was estimated in individual bands of the sprayed liquid. The characteristics of liq. spraying were obtained and simultaneous measurement of the transverse distribution of the stream d. emitted from the sprayer nozzle. The results obtained for the tested nozzle types were verified using a laboratory method recommended by ISO standards.*

**Keywords:** liquid volume distribution, droplet diameters, nozzle

Skuteczność zabiegów chemicznej ochrony roślin, uzyskanie optymalnej efektywności ekonomicznej oraz dbałość o bezpieczeństwo środowiska naturalnego uwarunkowane są w głównej mierze właściwym stanem technicznym zespołów i podzespołów urządzeń do opryskiwania w połączeniu z optymalną regulacją ich parametrów roboczych. Jako główny parametr roboczy wskazuje się odpowiednią jakość dysz rozpylających<sup>1-4</sup>. W pracach<sup>5, 6</sup> wzmiankowano, że nierównomierne pokrycie cieczą roboczą ma bezpośredni wpływ na jakość plonu, w wyniku pojawienia się przedawkowanych i niewystarczająco dawkowanych obszarów. Nie bez znaczenia pozostaje degradacja środowiska (rośliny, gleba, jakość produkowanej żywności) i bezpieczeństwo

Przedstawiono oryginalną i innowacyjną metodę oceny rozkładu objętości rozpylonej cieczy emitowanej przez rozpylacz ciśnieniowy. Metoda wykorzystuje punktowy pomiar średnic kropelek w poszczególnych pasmach strumienia rozpylonej cieczy. Pomiary wykonano dla różnych typów rozpylaczy ciśnieniowych na stanowisku wyposażonym w laserowy analizator anemometrii dopplerowskiej Dantec Dynamics 2D LDA/PDA. Na podstawie zarejestrowanych średnic kropelek oszacowano umowną objętość cieczy w poszczególnych pasmach rozpylonej cieczy, co umożliwiło ocenę jej rozkładu. Uzyskano szczegółowe informacje o charakterystyce rozpylonej cieczy z jednoczesnym pomiarem rozkładu poprzecznego gęstości strumienia emitowanego z dyszy rozpylacza, tak istotnej w ocenie stopnia nierównomierności jej rozkładu. Uzyskane wyniki dla badanych typów dysz zweryfikowano metodą laboratoryjną zalecaną przez normy ISO.

**Słowa kluczowe:** rozkład objętości cieczy, średnice kropli, rozpylacz

ludzi<sup>7-9</sup>). Właściwa dysza do opryskiwania zapewnia pożądany wzór oprysku, a także zmniejsza znoszenie oprysku<sup>10, 11</sup>. Badanie poziomego rozkładu poprzecznego objętości strumienia rozpylonej cieczy w kontekście oceny opryskiwaczy z belką poziomą jest stosowane zgodnie z normami<sup>12, 13</sup>. Uważa się, że określenie rozkładu objętościowego strumienia oprysku jest wyznacznikiem I rzędu przy ocenie wydajności strumienia rozpylonej cieczy<sup>14</sup>. W pomiarach stosowane są specjalne urządzenia o konstrukcji stacjonarnej i mobilnej, wyposażone najczęściej w poziome stoły rowkowe. Pomiary przeprowadza się w sposób ręczny lub z wykorzystaniem stołów elektronicznych, dla pojedynczych dysz, odcinków belek wyposażonych w grupę dysz oraz dysz umieszczonych na pełnej szerokości belki opryskowej. Używa się także mniejszych urządzeń i sprawdza się całą belkę etapami (złożenie strumieni z obszaru pełnego ich pokrycia)<sup>15</sup>. Wykonanie urządzeń jest zgodne ze specyfikacjami technicznymi normy<sup>16</sup>. Szczególnie w kontekście badań nowych konstrukcji dysz wydaje się istotne posiadanie pełnej wiedzy jednocześnie o makrostrukturze (rozkład poprzeczny, wydatek jednostkowy, ciśnienie robocze) i mikrostrukturze (ocena klasy kroplistości, spektrum wytwarzanych kropli wg normy<sup>17</sup>) rozpylonej cieczy. Rozwiązaniem innowacyjnym może być zaproponowany w pracy pomiar nieinwazyjny, punktowy o wysokiej



Dr inż. Dariusz LODWIK (ORCID: 0000-0001-6008-8030) w roku 1993 ukończył studia na Wydziale Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej w Płocku. W 1998 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych na tym samym wydziale. Jest adiunktem w Instytucie Inżynierii Mechanicznej PW w Płocku. Specjalność – budowa i eksploatacja maszyn.

**\* Adres do korespondencji:**

Instytut Inżynierii Mechanicznej, Politechnika Warszawska w Płocku, ul. Łukasiewicza 17, 09-400 Płock, tel.: (24) 367-22-12, e-mail: dariusz.lodwik@pw.edu.pl

rozdzielczości przestrzennej, łączący informacje z wielu pojedynczych punktów pomiarowych, w celu uzyskania statystyki strumienia do jednoczesnej oceny zasygnalizowanych mikro- i makroparametrów.

Celem pracy była próba zastosowania w badaniach dopplerowskiego laserowego analizatora 2D LDA/PDA w kontekście uzyskania szczegółowych informacji o charakterystyce rozpylonej cieczy z jednoczesną możliwością pomiaru rozkładu poprzecznego gęstości strumienia emitowanego z dyszy rozpylacza.

## Część doświadczalna

### Przedmiot badań

Badaniu poddano (i) rozpylacz standardowy RS11003, rozmiar dyszy 03 (*blue*), spektrum wytwarzanych kropli drobnych 144–235  $\mu\text{m}$  F (*fine*) dla ciśnień 3–4 bar<sup>18</sup>); (ii) uniwersalne rozpylacze inżektorowe AirMix (11003, 110025, 11002), rozmiary dysz 03 (*blue*), 025 (*purple*), 02 (*yellow*), spektrum wytwarzanych kropli odpowiednio dla: AirMix 11003 grubych 400–350  $\mu\text{m}$  C (*coarse*) dla ciśnień 2–4 bar, dla AirMix 110025 średnich 350–250  $\mu\text{m}$  M (*medium*) dla ciśnień 2–4 bar, dla AirMix 11002 średnich 350–250  $\mu\text{m}$  M (*medium*) dla ciśnień 2–4 bar<sup>19</sup>); (iii) rozpylacz płaskostrumieniowy o rozszerzonym zakresie ciśnienia XR11001VS, rozmiar dyszy 01 (*orange*), spektrum wytwarzanych kropli drobnych 144–235  $\mu\text{m}$  F (*fine*) dla ciśnień 1–3 bar<sup>20</sup>) i (iv) rozpylacz eżektorowy kompaktowy EZK11003, rozmiar dyszy 03 (*blue*), spektrum wytwarzanych kropli grubych 400–350  $\mu\text{m}$  C (*coarse*) dla ciśnień 3–3,5 bar<sup>18</sup>).

### Metodyka badań

Zastosowano odmienne metody pomiarowe, których spójnym celem była ocena rozkładu poprzecznego gęstości strumienia charakteryzowana współczynnikiem zmienności *CV*. Na stanowisku do badań rozkładu gęstości strumienia do oceny wykorzystano wyniki objętości cieczy wyłapane przez rowki stołu pomiarowego. W metodzie z wykorzystaniem laserowego analizatora przeprowadzono pomiary widma kropeł. Ideę przedstawiającą cel i sposoby zastosowania metod pomiarowych przedstawiono na rys. 1.

Zasadnicze badania wykonano laserowym analizatorem 2D LDA/PDA firmy Dantec Dynamics, o ogniskowej sondy nadawczej 1000 mm i sondy odbiorczej 700 mm. Badania prowadzono dla ciśnienia 3 bar (dokładność odczytu ciśnienia roboczego wynosiła  $\pm 0,1$  bar), rozpylając wodę o temp.  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Wykonanie pomiarów w układzie przestrzennym 3D zapewnił system trawersowy, w który był wyposażony laserowy analizator.

Pomiary punktowe przeprowadzono w warstwie oddalonej o 0,4 m od wylotu dyszy. W przeprowadzonych badaniach zastosowano metodę wyboru próby opartą na założeniu, że rozkład wielkości kropli w punkcie środkowym przedziału założonej strefy jest reprezentatywny w całej strefie. Zastosowano stopniowy ruch pomiarowy z dyskretnym krokiem o wartości 25 mm. Przyjęta wartość kroku odpowiadała punktom środkowym rowków pomiarowych stołu do badań rozkładu gęstości strumienia. Czas pobierania próbek  $t = 120$  s przyjęto jednakowy dla wszystkich pozycji. Podjęto próbę oceny rozkładu poprzecznego gęstości strumienia emitowanego z dyszy rozpylacza na podstawie zmierzonych średnic kropli w kolejnych założonych punktach pomiarowych w widmie rzeczywistym. Do opisu umownej objętości w poszczególnych pasmach strumienia wykorzystano średnią średnicę objętościową *D30*, reprezentującą jednorodny zbiór zastępczy o tej samej liczbie kropeł i takiej samej sumarycznej objętości wszystkich kropli zmierzonych w dyskretnych punktach pomiarowych. Weryfikację i ocenę wyników rozkładu gęstości strumienia wyznaczoną na podstawie wyników badań zasadniczych przeprowadzono na stanowisku pomiarowym wyposażonym w stół rowkowy połączony z układem automatycznego sterowania, kontroli i rejestracji wyników badań<sup>21</sup>). Badania weryfikacyjne wykonano w zakresie wartości parametrów funkcjonalnych i użytkowych przyjętych w badaniach zasadniczych, wykonanych laserowym analizatorem 2D LDA/PDA (ciśnienie 3 bar, czas pomiaru  $t = 120$  s, wylot dyszy w odległości 0,4 m od płaszczyzny rowków pomiarowych, rozpylano wodę o temp.  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , wilgotność względna 50–65%). Warunki środowiskowe w obu badaniach monitorowano w czasie pomiarów i utrzymano je na tym samym i stałym poziomie.

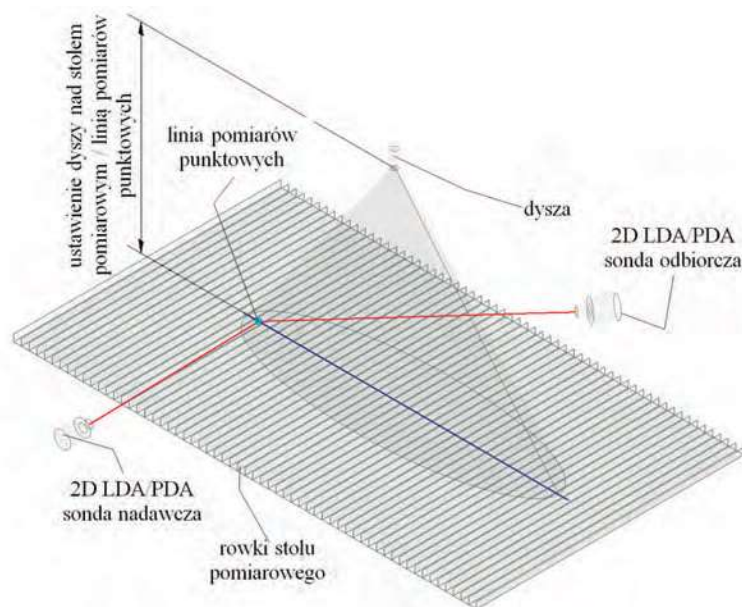


Fig. 1. Diagram presenting the ways of using measurement methods

Rys. 1. Schemat przedstawiający sposoby wykorzystania metod pomiarowych

Table. Results of droplet spectra and CV coefficients of variation

Tabela. Wyniki badań widm kropli i współczynników zmienności CV

Oznaczenie rozpylacza	D10	D30	Dv0,1	Dv0,5	Dv0,9	V100	CV(D30)	CV*
	μm					%		
RS11003	164,1	204,0	168,1	276	415,3	2,4	54,4	52,8
AirMix11003	244,2	305,9	250,3	429	573	0,4	66,7	65,4
AirMix110025	249	308,6	245,2	437	579,2	0,4	57,2	59,9
AirMix11002	226,6	280,2	219,1	396,6	556	0,6	56,8	61,1
XR11001VS	139,5	161,9	132,1	197,8	295,6	5,2	42,6	46,5
EZK11003	241,4	305,6	249,3	437,6	578,1	0,4	58,3	57,3

## Metody analityczne

Miarą oceny rozkładu objętości, nazywanej także gęstością strumienia rozpylonej cieczy, jest współczynnik zmienności, oznaczany  $CV^{(22, 23)}$ . Jest on względną miarą rozproszenia zmierzonych wyników w kolejnych punktach pomiarowych poddanych obserwacji, odniesioną do wartości średniej. Jego wartość jest wyznaczana na podstawie zależności (1):

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{V}} \cdot 100\% \quad (1)$$

w której  $\sigma$  oznacza odchylenie standardowe dla próby, a  $\bar{V}$  średnią arytmetyczną wyników.

Współczynnik zmienności  $CV(1)$  w obydwu metodach wyznaczono na podstawie odchylenia standardowego próby (2) oraz średniej arytmetycznej wyników (3) z zależności (2) i (3):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n-1}} \quad (2)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n V_i \quad (3)$$

w których  $V_i$  oznacza objętość cieczy w  $i$ -tym rowku stołu pomiarowego lub  $i$ -tym punkcie pomiaru z wykorzystaniem analizatora 2D LDA/PDA.

## Wyniki badań i ich omówienie

Wyznaczone charakterystyki widm kropli, otrzymane na podstawie zmierzonych rzeczywistych średnic w kolejnych punktach prowadzonej analizy, zestawiono w tabeli. Charakterystyka obejmowała średnie średnice: arytmetyczną  $D10$ , objętościową  $D30$ , średnice objętościowe, poniżej których mniejsze krople stanowią 10, 50 i 90% całkowitej objętości (odpowiednio  $Dv0,1$ ;  $Dv0,5$  i  $Dv0,9$ ) oraz

procent całkowitej objętości kropli mniejszych niż  $100 \mu m$  ( $V100$ ). Na podstawie danych z wyników średnic średnic objętościowych ( $D30$ ) zmierzonych w dyskretnych punktach pomiarowych obliczono objętości  $V(D30)$  i wyznaczono współczynnik zmienności  $CV(D30)$ , natomiast na podstawie wyników pomiarów zarejestrowanych objętości cieczy w poszczególnych cylindrach pomiarowych stanowiska wyposażonego w wielorowkowy stół pomiarowy obliczono współczynnik zmienności  $CV^*$ . Wyniki zestawiono w tabeli i na rys. 2.

Charakter rozkładu objętości cieczy dla rozpylacza AirMix 11003 przedstawiono w postaci histogramu wykreślonego na podstawie pomiaru rozkładu średnic kropli analizatorem PDA oraz objętości na stole wielorowkowym (rys. 3).

## Podsumowanie

Metoda laserowej anemometrii Dopplera może być wykorzystana do oceny poprzecznego rozkładu oprysku i wyznaczania odpowiadającej mu wartości wskaźnika zmienności  $CV$  jako alternatywa dla analogicznych pomiarów na stole rowkowym. Potwierdzają to wyniki przedstawione w pracy. Badane dysze w wystarczającym stopniu spełniają kryteria oceny jakości ich pracy w zakresie opty-

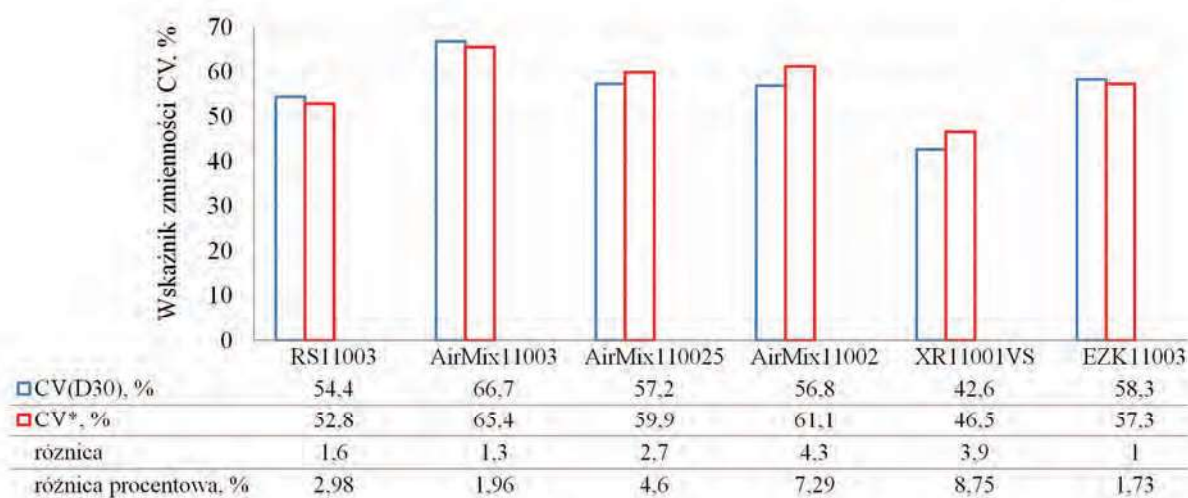


Fig. 2. CV coefficient of variation,  $CV(D30)$  – based on the droplet diameter distribution,  $CV^*$  – based on the volume on the groove table

Fig. 2. Wskaźnik zmienności CV i  $CV(D30)$  na podstawie rozkładu średnic kropli,  $CV^*$  na podstawie objętości na stole rowkowym

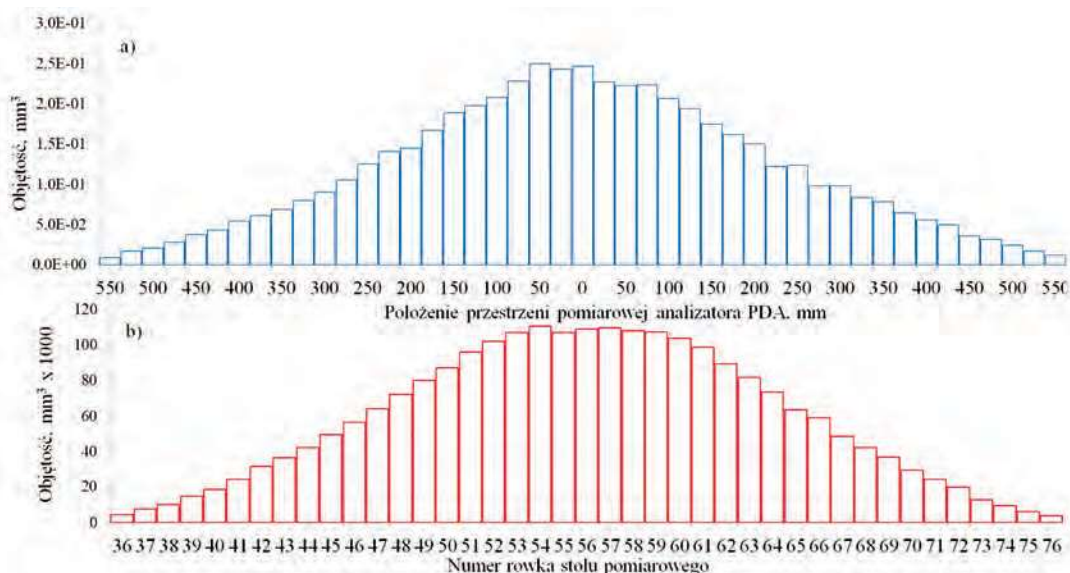


Fig. 3. Volume distribution histogram, AirMix 11003 nozzle, determined based on the measurement of: a) droplet diameter distribution, b) on the groove table  
 Rys. 3. Histogram rozkładu objętości, dysza AirMix 11003, wyznaczonych na podstawie pomiaru: a) rozkładu średnic kropli, b) na stole rowkowym

malnej frakcji wytwarzanych kropli. Pomimo istotnych różnic w pobieraniu próby objętości (ok. 1000 jednostek) w obu metodach (punktowa na podstawie średnic kropli i rozkładu objętości), otrzymano zbliżony charakter rozkładu i wyniki różniące się w niewielkim stopniu. Wyniki uzyskane z pomiaru punktowego w jednej płaszczyźnie mogą być obarczone błędem, mimo to podjęto próbę ich weryfikacji niezależną metodą stosowaną w ocenie makro. Zalecenia w kontekście badania widm wielkości kropli wskazują jednak na wyznaczenie średniej z prób w warstwie (przekroju) struktury rozpylonej cieczy (minimum 5 punktów pomiarowych wyznaczonych na głębokości strugi). Zalecenie zostanie uwzględnione przez autora w kolejnych pracach badawczych prowadzonych w kontekście sposobu pobrania próby i jej wpływu na wielkości popełnianego błędu. Walidacja wyników uzyskanych zaproponowaną metodą pomiarową z wynikami uzyskanymi na stole rowkowym (ISO) będzie etapem wdrażania innowacyjnych rozwiązań zwiększających możliwości badawcze stanowisk i aparatury (uzyskanie pełnej wiedzy do jednoczesnej oceny mikro- i makroparametrów, badanie bez stosowania stołu rowkowego). Metoda i otrzymane wyniki mogą być z powodzeniem stosowane w przypadku złożenia dysz na wirtualnej belce w kontekście ocen strumieni z obszaru pełnego ich pokrycia.

Otrzymano: 06-10-2024

Zaakceptowano: 28-11-2024

Zrecenzowano: 20-11-2024

Opublikowano: 20-12-2024

#### LITERATURA

- [1] P.A. Kluza, I. Kuna-Broniowska, S. Parafiniuk, *Sustainability* 2019, **11**, nr 23, 6716.
- [2] A.T. Martini i in., *J. Agric. Sci.* 2019, **11**, nr 4, 2006.
- [3] R. Hołownicki, *Technika opryskiwania roślin*, Wyd. Plantpress, Kraków 2006.
- [4] D. Lodwik, J. Pietrzyk, *Motrol Comm. Mot. Energ. Agric.* 2014, **16**, nr 1, 65.
- [5] A.J. Lipiński, S. Lipiński, P. Burg, S.M. Sobotka, *J. Agric. Food Res.* 2022, **10**, 100432.
- [6] A. Biglia i in., *Sci. Total Environ.* 2022, **845**, 157292.
- [7] P.H. Dubuis i in., *Sci. Total Environ.* 2023, **881**, 163371.
- [8] S. Privitera, G. Manetto, S. Pascuzzi, D. Pessina, E. Cerruto, *Agronomy* 2023, **13**, nr 3, 678.
- [9] A. Obraniak, J. Stelmach, T. Olejnik, *Przem. Chem.* 2019, **98**, nr 5, 7516.
- [10] C.R. Chethan, P.K. Singh, R.P. Dubey, S. Chander, D. Ghosh, *Innov. Farm.* 2019, **4**, nr 1, 049.
- [11] J.C. Ferguson i in., *Crop Protect.* 2015, **76**, 1.
- [12] E. Gil, M.R. Bueno, J. Campos, M. Gallart, J.P.A.R. da Cunha, *Trans. ASABE* 2021, **64**, nr 5, 1635.
- [13] M. Milanowski, A. Subr, S. Parafiniuk, *Appl. Sci.* 2022, **12**, nr 2, 5821.
- [14] K.M. Bade, R.J. Schick, P.O. Box, *Mat. Konf. 11<sup>th</sup> International Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Vail (Colorado), 26–30 lipca 2009, 152.
- [15] D. Longo, G. Manetto, R. Papa, E. Cerruto, *Appl. Sci.* 2020, **10**, nr 15, 5221.
- [16] B. Cieniawska, S. Parafiniuk, P.A. Kluza, Z. Otachel, *Appl. Sci.* 2023, **13**, nr 7, 4433.
- [17] ANSI/ASAE S572.1:2009, *Spray nozzle classification by droplet spectra*.
- [18] Nozzle manufacturer's website MMAT Agro Technology, <http://www.mmat.pl/produkty/rozpylacze-mmat>, dostęp 14 marca 2023 r.
- [19] Nozzle manufacturer's website AirMix, <https://www.agrotop.com/produkty/duesen/airmix/airmixR-flat-fan/>, dostęp 16 marca 2023 r.
- [20] Nozzle manufacturer's website TeeJet, [https://www.teejet.com/pl-pl/-/media/dam/agricultural/europe/sales-material/catalog/broadcast\\_noz-zles-pl.pdf#page=6](https://www.teejet.com/pl-pl/-/media/dam/agricultural/europe/sales-material/catalog/broadcast_noz-zles-pl.pdf#page=6), dostęp 16 marca 2023 r.
- [21] D. Lodwik, J. Pietrzyk, *J. Res. Appl. Agric. Eng.* 2013, **59**, nr 2, 103.
- [22] A. Zhang i in., *INMATEH Agric. Eng.* 2022, **68**, nr 3, 147.
- [23] D. Lodwik, J. Pietrzyk, W. Malesa, *Appl. Sci.* 2020, **10**, nr 7, 2395.