

Artur LEWANDOWSKI, Ireneusz ZBICIŃSKI

e-mail: artur_lewandowski@vp.pl

Katedra Procesów Ciepłych i Dyfuzyjnych, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Badanie zjawiska koalescencji podczas zderzeń strug cieczy

Wprowadzenie

Koalescencja jest zjawiskiem, które występuje podczas zderzeń kropeł rozpylanego materiału w różnego typu kolumnach suszarniczych. Zjawisko koalescencji powstaje w wyniku łączenia się dwóch lub więcej kropeł cieczy w jedną większą kroplę. W przypadku, gdy zjawisko to zachodzi w warunkach swobodnego łączenia, nie obserwujemy takich zachowań jak *bouncing*, czyli kozłowanie kropeł czy *stretching separation* (SS) – rozdzielenie przez rozciągnięcie. Tego typu zachowania kropeł zauważyć można w momencie, gdy krople zderzają się z większą siłą i pod pewnym kątem. Charakter, jak i kształt kropeł po kolizji, uzależniony jest od kilku czynników, takich jak: prędkość kropeł w momencie zderzenia, kąt zderzenia, napięcie powierzchniowe kropeł a także własności rozpylanej cieczy [1].

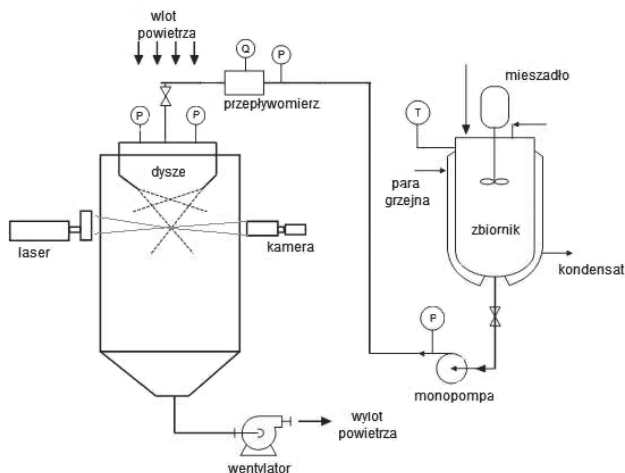
W zależności od kąta zderzenia kropeł w wymuszonej kolizji kropeł możemy wyróżnić dwojakie zachowanie kropeł. W przypadku, kiedy krople zderzają się w tej samej płaszczyźnie lub gdy są w niewielkim stopniu przesunięte względem siebie mamy do czynienia ze zjawiskiem *reflexive separation* (RS), czyli wtórnym rozdzielaniem kropeł [4]. Podczas zjawiska RS obserwujemy powstawanie n-satelit w trakcie kolizji dwóch cząstek. Jest to mała grupa kropeł, która powstaje w momencie ponownego rozdzielania się jednej kropli na dwie mniejsze.

Podobnym zjawiskiem jest *stretching separation* (SS), które powstaje w momencie kolizji dwóch lub więcej kropeł, poruszających się z dużą prędkością, ulegając zderzeniu pod określonym kątem. Zjawisko to polega na zderzeniu się kropli, których oś symetrii nie leży w jednej płaszczyźnie. Podczas zderzenia zachodzi koalescencja tylko części z każdej kropli, a następnie w miejscu ich połączenia zachodzi proces rozciągnięcia i w konsekwencji rozerwanie na dwie krople. Zjawisko to można zauważyć przy dużej liczbie *Webera* [2, 3].

Celem pracy było określenie rozkładu średnic kropeł, prędkości i czynnika kształtu podczas kolizji dwóch strumieni kropeł.

Instalacja pomiarowa

System do analizy zjawiska koalescencji kropeł składa się z komory o wymiarach 1000×1000×2300 mm, w której został zainstalowany układ czterech dysz (50°, wydajność 4,5 kg/h), pracujących niezależnie od siebie w taki sposób, aby można było zmieniać położenie każdej z dysz względem siebie (Rys. 1). W pracy do rozpylania wykorzystano



Rys. 1. Schemat instalacji doświadczalnej

jedną i dwie dysze do celów porównawczych, uzyskując w ten sposób jeden z parametrów atomizacji, wpływający na charakter uzyskiwanych kropeł. Instalacja została wyposażona w system pomiaru ciśnienia cieczy na każdej z dysz i w miernik przepływu rozpylanej cieczy. Kontrola ilości podawanej surówki, jak i utrzymanie temperatury układu, odbywało się za pomocą systemu sterowania i akwizycji danych (LabVIEW).

System pomiarowy

Do analizy struktury rozpylanej strugi wykorzystano system laserowy *SizingMaster Shadow* firmy *Lavision*, Niemcy, składający się z kamery połączonej z mikroskopem, zainstalowanej na ruchomym statywie, mogącej zmieniać swoje położenie w osi X i Y. Jako źródło światła zastosowany został laser o mocy 400 mJ. Położenie lasera można było zmieniać w osi Y co umożliwiało precyzyjne oświetlenie strugi kropeł. System ten umożliwia określenie średnicy kropeł, ich prędkości a także czynnika kształtu.

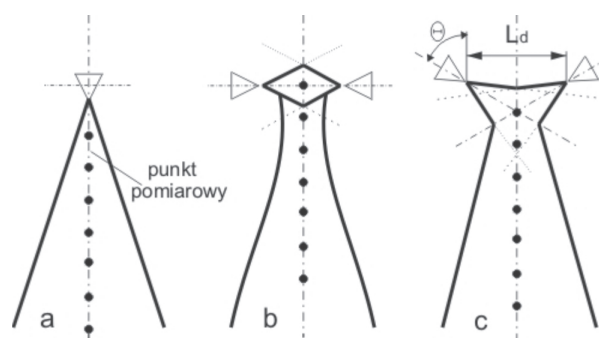
Założenia eksperymentalne

W ramach pracy zrealizowano trzy testy, w których zastosowano ten sam zestaw dysz. Zakres przeprowadzonych eksperymentów przedstawiono w tab. 1. Odległość pomiędzy dyszami przyjęto jako wartość stałą, równą $L_d = 0,07$ m. Krok pomiarowy wynosił 0,02 m w osi Y. Całkowita długość pomiaru wynosiła $L_y = 0,12$ m.

Tab. 1. Parametry eksperymentu

Testy	I	II	III
n – dysz	1	2	2
Kąt Θ (°)	0	60	90
Ciśnienie p (bar)	20÷21	20÷21	20÷21
Odległość L_y (m)	0÷0,12	0÷0,12	0÷0,12

W przeprowadzonych eksperymentach uformowane cząstki można było zaobserwować w minimalnej odległości 10 mm od wylotu z dyszy – w mniejszej odległości obserwowano lamele strugi cieczy. Z tego względu za punkt początkowy (wartość $L_y = 0$ na wykresach) przyjęto odległość 10 mm od dyszy. Materiałem wykorzystanym w eksperymencie była woda o temperaturze $T = 29\text{--}31^\circ\text{C}$. W pierwszym etapie przeprowadzono analizę struktury rozpylanej strugi wody dla jednej dyszy. W drugim etapie przeprowadzono eksperyment dla ustawień pod kątem $\Theta = 60, 90^\circ$. Na rys. 2 przedstawiono trzy ustawienia dysz, dla których przeprowadzono eksperymenty.

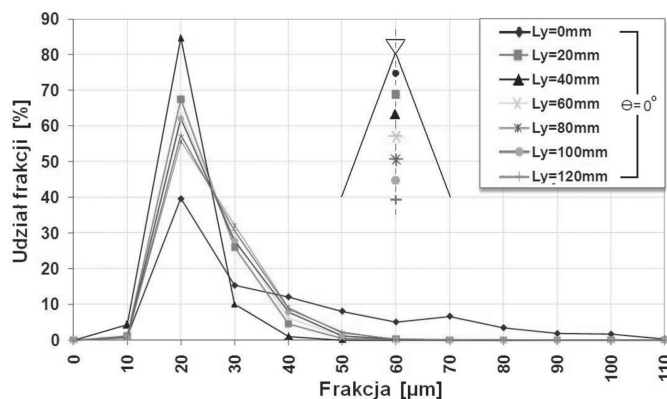


Rys. 2. Geometria ustawień poszczególnych dysz

Wyniki badań

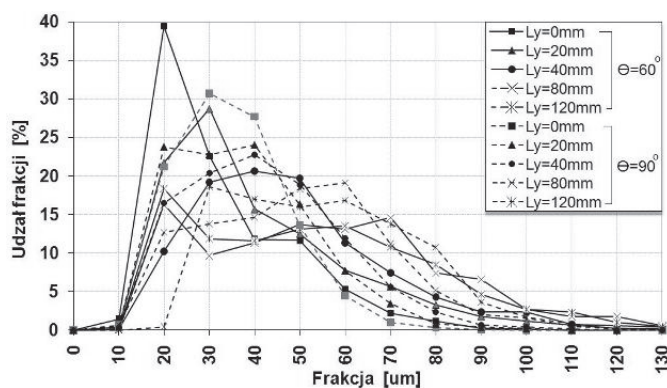
Do wykonania analiz zastosowano oprogramowanie do analizy obrazu firmy *Lavision*. Analizę przeprowadzono pod kątem wielkości kropel, prędkości, a także współczynnika określającego kulistość kropel.

Rezultaty badań wskazują, że dla różnych ustawień dysz względem siebie, zauważamy inny rozkład kropel, jak i prędkości. Na rys. 3 przedstawiono wyniki z analizy *particle size distribution* (PSD) dla jednej dyszy. Ukazują nam typowy rozkład logarytmiczny dla wartości przepływu $Q = 3,30\text{--}3,45\text{ kg/h}$ i wartości ciśnienia $p = 20\text{--}21\text{ bar}$. Zauważyc możemy duży udział mniejszej frakcji kropel (20–25 μm).



Rys. 3. Rozkład frakcji kropel w funkcji wysokości ($n = 1, \Theta = 0^\circ$)

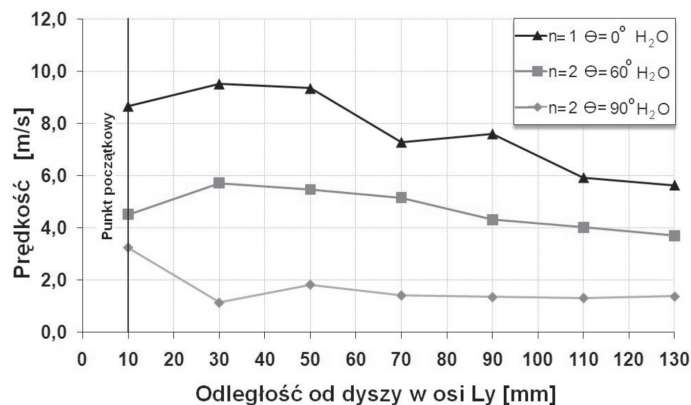
W przypadku, gdy zastosowano dwie dysze ustawione naprzeciw siebie (Rys. 2b, c), zaobserwowano zmiany struktury rozpylanej strugi. Ilość podawanego roztworu na dyszę wynosiła $Q = 6,10\text{--}6,30\text{ kg/h}$ a temperatura wody $T_{\text{H}_2\text{O}} = 17\text{--}18^\circ\text{C}$. Na rys. 4 przedstawiono rozkład frakcji kropel podczas rozpylania z dwóch dysz w odległości $L_d = 70\text{ mm}$, ustawionych pod kątem $\Theta = 60$ i 90° . Można zauważyć, że kąt ustawienia dysz ma duży wpływ na charakter otrzymanej strugi, jak i na wielkość kropel. Dla kąta rozpylania $\Theta = 60^\circ$ następuje wymuszona koalescencja kropel na drodze kolizji kropel. Efektem jest zwiększenie rozmiaru kropel i ich udziału procentowego w całej strudze. Dla kąta rozpylania 90° zjawisko koalescencji zachodzi w mniejszym stopniu, co ukazuje rys. 4.



Rys. 4. Rozkład frakcji kropel dla dwóch ustawień dysz ($n = 1, \Theta = 0^\circ/90^\circ$)

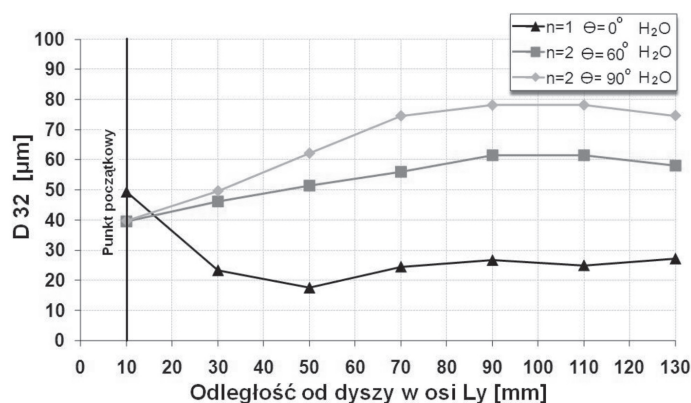
Rozkład prędkości dla jednej dyszy, jak i dla zastosowania dwóch dysz, ukazuje wykres (Rys. 5). Wartość prędkości dla dwóch dysz, ustawionych pod kątem $\Theta = 90^\circ$, jest znacznie mniejsza i mieści się w przedziale 2–0,5 m/s. Przy ustawieniu dysz ($n = 2; \Theta = 60^\circ$) prędkość znajdowała się w przedziale 3,5–1,5 m/s. Mała prędkość dla dwóch dysz ustawionych pod kątem $\Theta = 90^\circ$ wynika z charakteru rozpylania, a także z efektu wygaszania się prędkości poszczególnych kropel na skutek zderzeń kropel w tej samej płaszczyźnie. Kropłe rozbijają się, pozostawiając mniejsze kropelki, których prędkość jest znacznie mniejsza w stosunku do kropel ulegających kolizji.

Średnia wartość *relative span factor* (RSF) przy rozpylaniu z jednej dyszy wynosiła 1,04. Przy rozpylaniu z dwóch dysz ustawionych pod kątem $\Theta = 60$ i 90° uzyskano średnią wartość RSF 0,87 oraz 0,99.



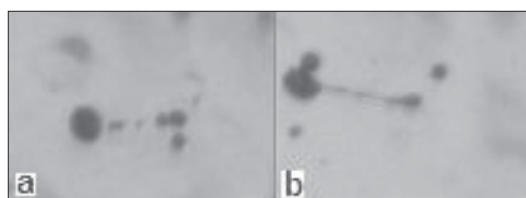
Rys. 5. Rozkład prędkości kropel w strudze dla trzech ustawień dysz

Na rys. 6 przedstawiono zmiany średnic *Sautera* w różnej odległości od dysz dla trzech kątów zderzeń, tj.: 0, 60 oraz 90 stopni.



Rys. 6. Średnica *Sautera* dla trzech ustawień dysz

Rys. 7a i b przedstawiają zachowanie kropel podczas kolizji. Zastosowanie układu składającego się z dwóch dysz umożliwia zaobserwowanie kolizji kropel i widoczne rozbicie kropel.



Rys. 7. Zachowanie kropel w momencie kolizji z inną kropką: a) efekt *reflexive separation*, b) efekt *stretching separation*

Wnioski

W pracy określono wpływ zastosowania wielodyszowego układu rozpylania na charakter rozpylanej strugi. Ustawienie dysz pod kątem $\Theta = 60^\circ$ oraz $\Theta = 90^\circ$ względem siebie intensyfikuje proces koalescencji kropel, w efekcie czego uzyskano zwiększenie udziału dużych kropel w strudze.

Zastosowanie układów rozpylania, składających się z wielu dysz, pozwala na uzyskiwanie w procesie suszenia rozpyłowego materiału o większej średniej średnicy, co umożliwia kontrolę jednego z ważnych parametrów charakteryzujących jakość produktu.

LITERATURA

- [1] Gwon Hyum Ko, Hong Sun Ryou: *Aerosol Science*, **36**, 1300 (2005).
- [2] M.J.V. Goldschmidt, G.G.C. Weijers, R. Boerefijn, J.A.M. Kuipers: *Powder Tech.*, **138**, 39 (2003).
- [3] J.J. Nijdam, B. Guo, D.F. Fletcher, T.A.G. Langrish: *Drying Tech.* **22**, nr 6, 1463 (2008).
- [4] G. Lian, C. Thornton, M. Adams: *Chem. Eng. Sci.* 3381 (1998).