

Magdalena MATUSZAK, Marek OCHOWIAK, Sylwia WŁODARCZAK

e-mail: magdalena.matuszak@put.poznan.pl

Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej, Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska, Poznań

Metody poprawy efektywności procesu rozpylania w nebulizatorach pneumatycznych

Wstęp

Proces atomizacji cieczy jest szeroko wykorzystywany w wielu gałęziach przemysłu, m.in. w procesach takich jak: suszenie rozpyłowe, wytwarzanie emulsji, zabiegi agrotechniczne, produkcja proszków, aerozoloterapia wziewna [Lefebvre, 1989; Liu, 2000; Crowe, 2006; Hede i in., 2008; Sosnowski, 2012; Schlender i in., 2015]. Techniki rozpylania wykorzystujące dodatkowy strumień gazu (napowietrzanie) zapewniają dobrą atomizację cieczy ze średnią średnicą kropeł generowanego aerozolu rzędu kilku mikrometrów [Petersen, 2004]. Metody mieszania strumienia gazu z cieczą mające miejsce wewnątrz rozpylacza zasadniczo różni się od innych technik rozpylania dwufazowego i pozwalają na uzyskanie znaczącej poprawy wydajności pod względem mniejszych średnic kropeł oraz mniejszego ciśnienia wtłoku [Sovani i in., 2001].

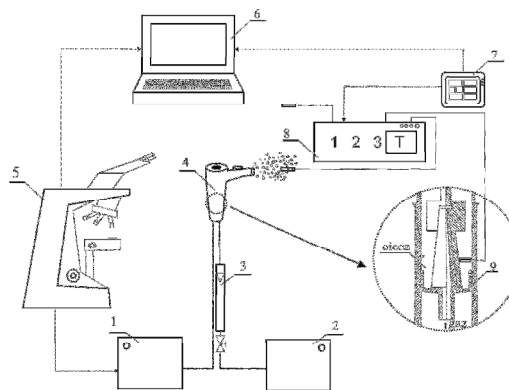
Aerozoloterapia ze względu na szereg zalet (m.in. niska inwazyjność, stosunkowo łatwa i wygodna aplikacja leku, bezbolesne i szybkie dawkowanie, możliwość indywidualnego doboru leku oraz jego dawki) cieszy się coraz większym zainteresowaniem [Karolewicz i in., 2009; Sosnowski, 2012]. Wzrost zainteresowania metodami terapii wziewnej tłumaczy także fakt, że obecnie choroby układu oddechowego zalicza się do najczęściej występujących i najszybciej rozwijających się chorób na świecie [Amirav, 2004; Marianecci i in., 2011; Pahlwa i in., 2012].

Zarówno wzrost temperatury rozpylanej cieczy, jak i dodatkowe napowietrzanie cieczy (realizowane poprzez wprowadzenie do układu gazu w postaci pęcherzyków) prowadzą do zaniku kropeł o stosunkowo dużych rozmiarach, a rozkład wielkości kropeł staje się bardziej jednorodny [Petersen, 2004; Ochowiak i in., 2016]. Z punktu widzenia dostarczania leków do organizmu pacjenta drogą wziewną jest to zjawisko korzystne, bowiem skuteczność terapii wziewnej w istotny sposób zależy od rozmiaru kropeł. Krople o największych rozmiarach w większości deponują się w górnych drogach oddechowych, a do dolnych dróg oddechowych docierają wyłącznie krople o średnicach mniejszych od 5 μm [Sosnowski, 2012].

Badania miały na celu podjęcie próby zwiększenia efektywności procesu rozpylania w nebulizatorze pneumatycznym. Przeanalizowano wpływ temperatury rozpylanej cieczy oraz dodatkowego napowietrzania cieczy w głowicy rozpylającej na charakter uzyskanego aerozolu.

Badania doświadczalne

Stanowisko doświadczalne składało się z następujących głównych elementów: nebulizatora pneumatycznego wraz z głowicą rozpylającą o zmodyfikowanej konstrukcji, rotametr gazowy, mikroskopu optycznego z kamerą, laptopa z oprogramowaniem, platformy komputerowej *Raspberry Pi*, elementu wykonawczego z sondami pomiarowymi oraz elementu grzewczego. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 1. Podczas badań wykorzystano nebulizator pneumatyczny *MedelJet Family* wraz z głowicą rozpylającą *MedelJet Basic* o pojemności 6 ml, którą wyposażono w końcówkę do nosa. Szybkość inhalacji nebulizatora wynosi 0,28 [ml/min], a maksymalnym ciśnieniem to 230 [kPa]. Standardowa głowica rozpylająca *MedelJet Basic* uległa modyfikacji celem wprowadzenia do układu dodatkowego napowietrzania oraz ogrzania nebulizowanej cieczy. W tym celu w dnie głowicy wykonano cztery otwory, poprzez które wprowadzono do układu cztery rurki (pełniące rolę aeratora). Wszystkie rurki wychodzące z wykonanych otworów podłączono do kolektora. Za pomocą wężyka poprzez rotametr i zawór dostarczano do kolektora dodatkowy strumień powietrza z kolejnego inhalatora pneumatycznego tego samego typu. Zastosowanie zaworu umożliwiło



Rys. 1. Schemat stanowiska doświadczalnego wykorzystanego do badań, składającego się z następujących elementów: 1,2 – nebulizator pneumatyczny, 3 – rotametr gazowy, 4 – zmodyfikowana głowica rozpylająca, 5 – mikroskop, 6 – laptop, 7 – platforma komputerowa *Raspberry Pi*, 8 – element wykonawczy z sondami pomiarowymi, 9 – uzwojenie grzewcze

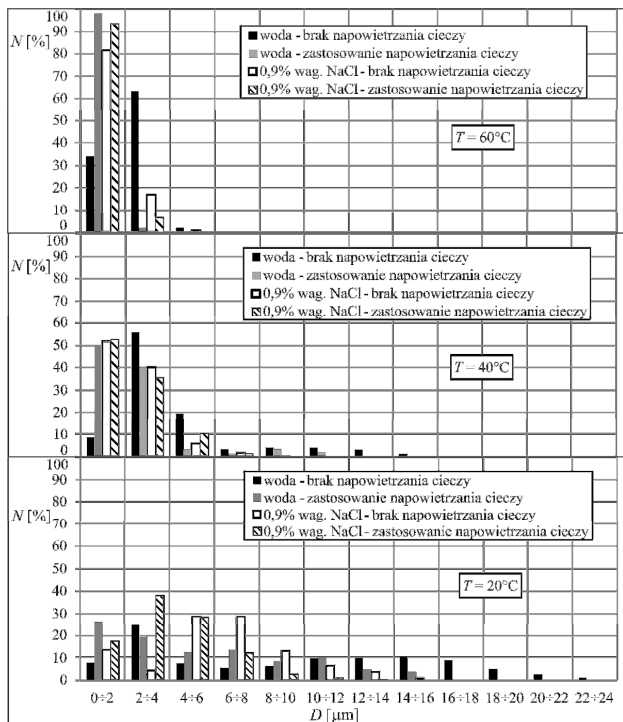
regulację natężenia przepływu dodatkowego powietrza dostarczanego do naczynia rozpylającego. Ponadto do głowicy rozpylającej wprowadzono element grzewczy w postaci zwoju grzewczego wykonanego z drutu oporowego o średnicy 0,7 mm i oporności 2,85 [Ω/m], pokrytego politetrafluoroetylenem, celem ogrzania zalegającej w naczyniu cieczy.

Materiały. Rozpylaniu poddano wodę oraz wodny roztwór 0,9 %-owego chlorku sodu. Badania wykonano dla natężeń przepływu dodatkowego strumienia gazu napowietrzającego wynoszących od 0 do $8,33 \cdot 10^{-5}$ [m^3/s]. Rozpylaną cieczą poddano nebulizacji w zakresie temperatur od 20 do 60 $^{\circ}\text{C}$.

Metodyka. W celu przeprowadzenia analizy wielkości kropeł powstałego aerozolu wykorzystano metodę wyłapywania kropeł aerozolu na ciecz immersyjną (olej). Do analizy średnic kropeł generowanych aerozoli wykorzystano program *Image-Pro Plus* firmy *Media Cybernetics*. Dokładność pomiaru średnic kropeł wynosiła $\pm 0,3 \mu\text{m}$. Aerozole zostały scharakteryzowane poprzez przeanalizowanie około 5000 kropeł dla każdej serii pomiarowej. W wyniku przeprowadzonych badań oszacowano następujące średnie średnice kropeł: $D_{0,5}$, D_{30} , D_{32} oraz D_{43} , które opisane zostały szczegółowo w pracy Lefebvre [1989]. Warto zaznaczyć, że są one wielkościami poglądowymi i umownymi, pozwalającymi w sposób uproszczony na ocenę jednorodności uzyskanych rozkładów kropeł generowanych aerozoli. Zarówno wielkość średnic kropeł, jak i charakter generowanego aerozolu odgrywają kluczową rolę z punktu widzenia przemysłu medycznego i farmaceutycznego, gdzie bardzo istotne jest wytwarzanie aerozoli o charakterze monodispersyjnym [Karolewicz i in., 2009; Sosnowski, 2012].

Wyniki i ich analiza

Na rys. 2 przedstawiono przykładowe wykresy obrazujące rozkłady liczbowe średnic kropeł uzyskanych w wyniku atomizacji wody oraz wodnego roztworu chlorku sodu przy użyciu nebulizatora pneumatycznego. Badane cieczy prowadzono w różnym zakresie temperatur nebulizowanej cieczy (T) oraz przy różnym objętościowym natężeniu przepływu dodatkowego strumienia gazu napowietrzającego ciecz (\dot{V}_g). Zaobserwowano, że zarówno temperatura cieczy jak i dodatkowe napowietrzanie cieczy wywierają wyraźny wpływ na charakter generowanego aerozolu. Uzyskane widma



Rys. 2. Widma rozkładu średnic kropeł aerozolu uzyskane w wyniku rozpylenia wody oraz 0,9 %-owego wodnego roztworu NaCl przy zastosowaniu ogrzania nebulizowanej cieczy w zakresie temperatur od 20 do 60 °C oraz przy braku napowietrzania bądź z zastosowaniem dodatkowego natężenia przepływu gazu wynoszącego $8,33 \cdot 10^{-5} \text{ [m}^3/\text{s]}$

rozpylenia wykazały, że wraz ze wzrostem udziału temperatury rozpylanej cieczy jak i z zastosowaniem dodatkowego napowietrzania cieczy następuje wzrost liczby kropeł o większych mniejszych oraz zanik kropeł o średnicach największych. Ponadto zaobserwowano, że widmo rozkładu średnic kropeł staje się bardziej jednorodne i ulega przesunięciu w kierunku mniejszych średnic kropeł aerozolu.

W tab. 1 zestawiono wyniki badań dla wody oraz 0,9 %-owego wodnego roztworu chlorku sodu, które poddano podczas trwania procesu atomizacji dodatkowemu ogrzewaniu oraz napowietrzaniu.

Dane zestawione w tab. 1 dowodzą, że wartości wszystkich średnic średnic zależą zarówno od temperatury nebulizowanej cieczy, jak i dodatkowego napowietrzania rozpylanej cieczy. Obserwuje się zmniejszenie wartości średnic $D_{0,5}$, D_{30} , D_{32} i D_{43} na skutek wzrostu temperatury cieczy oraz w wyniku wprowadzenia do układu dodatkowego strumienia gazu w postaci pęcherzyków powietrza.

Tab. 1. Przykładowe wyniki badań rozpylenia wody oraz 0,9-procentowego wodnego roztworu NaCl z uwzględnieniem ogrzewania oraz napowietrzania cieczy

Badana ciecz	T [°C]	\dot{V}_g [m ³ /s]	$D_{0,5}$ [µm]	D_{30} [µm]	D_{32} [µm]	D_{43} [µm]
woda	20	0	9,65	12,40	15,33	16,53
woda		$8,33 \cdot 10^{-5}$	5,76	7,39	9,07	9,938
0,9 % wag. NaCl		0	6,43	7,52	8,68	9,53
0,9 % wag. NaCl		$8,33 \cdot 10^{-5}$	3,84	5,03	6,02	6,86
woda	40	0	3,84	6,24	8,52	10,43
woda		$8,33 \cdot 10^{-5}$	2,56	4,37	6,85	8,92
0,9 % wag. NaCl		0	1,93	3,10	3,90	4,68
0,9 % wag. NaCl		$8,33 \cdot 10^{-5}$	1,92	3,09	3,84	4,38
woda	60	0	2,57	2,78	3,02	3,22
woda		$8,33 \cdot 10^{-5}$	1,28	1,31	1,57	1,89
0,9 % wag. NaCl		0	1,29	0,98	2,58	3,07
0,9 % wag. NaCl		$8,33 \cdot 10^{-5}$	0,64	1,40	1,87	2,27

Tab. 2. Przykładowe wyniki badań rozpylenia wody rozpylanej przy zastosowaniu różnych wartości natężenia przepływu powietrza dla temperatury równej 20 °C

Badana ciecz	\dot{V}_g [m ³ /s]	$D_{0,5}$ [µm]	D_{30} [µm]	D_{32} [µm]	D_{43} [µm]
woda	$1,39 \cdot 10^{-5}$	10,24	11,89	13,73	14,93
woda	$2,78 \cdot 10^{-5}$	9,65	11,46	13,61	14,62
woda	$4,17 \cdot 10^{-5}$	9,00	10,02	11,72	12,71
woda	$5,56 \cdot 10^{-5}$	7,72	9,14	10,74	11,47
woda	$8,33 \cdot 10^{-5}$	5,76	7,39	9,07	9,94

Ponadto przeprowadzone badania wykazały wyraźny wpływ objętościowego natężenia przepływu gazu na proces atomizacji (Tab. 2). Zaobserwowano, że wartości wszystkich średnic średnic ulegają zmniejszeniu. Warto podkreślić, że wartość $D_{0,5}$ uległa zmniejszeniu w przybliżeniu o 50 % wraz ze wzrostem natężenia przepływu gazu z $1,39 \cdot 10^{-5} \text{ [m}^3/\text{s]}$ do $8,33 \cdot 10^{-5} \text{ [m}^3/\text{s]}$.

Podsumowanie

Analiza uzyskanych wyników badań wykazała, że wielkość kropeł, widmo rozpylenia oraz średnie średnice kropeł w istotny sposób zależą od temperatury nebulizowanej cieczy oraz objętościowego natężenia przepływu napowietrzającego gazu.

Wzrost temperatury oraz zastosowanie dodatkowego strumienia gazu przyczynia się do zmniejszenia średnic tworzących się kropeł, co jest niezwykle ważne z punktu widzenia zastosowań medycznych.

Ponadto przeprowadzone badania wykazały, że ogrzanie oraz dodatkowe napowietrzanie rozpylanych cieczy powoduje, że widmo rozpylenia staje się coraz bardziej jednorodne, a aerozol przyjmuje charakter coraz bardziej monodispersyjny.

LITERATURA

Amirav I., (2004). Aerosol therapy / Aerosol terapia. *Ital. J. Pediatr.*, 30, 147-156

Crowe C.T., (2006). *Multiphase flow handbook*. Taylor and Francis Group, Boca Raton

Hede P.D., Bach P., Jensen A.D., (2008). Two-fluid spray atomization and pneumatic nozzles for fluid bed coating/agglomeration purposes: a review. *Chem. Eng. Sci.*, 63, 3821-3842. DOI: 10.1016/j.ces.2008.04.014

Karolewicz B., Pluta J., Haznar D., (2009). Nebulizacja jako metoda podawania leków. *Farm. Pol.*, 65(4), 291-304.

Lefebvre A.H., (1989). *Atomization and Sprays*. Hemisphere Publ. Corp., New York

Liu H., (2000). *Science and engineering of droplets-fundamentals and applications*. William Andrew Publ., New York

Marianecci C., Di Marzio L., Rinaldi F., Carafa M., Alhaique F., (2011). Pulmonary delivery: innovative approaches and perspectives. *J. Biomater. Nanobiotechnol.*, 2, 567-575. DOI: 10.4236/jbnb.2011.225068

Ochowiak M., Doligalski M., Broniarz-Press L., Matuszak M., Gościński A., (2016). Characterization of sprays for thermo-stabilized pneumatic nebulizer. *Europ. J. Pharm. Sci.*, 85, 53-58. DOI: 10.1016/j.ejps.2016.01.022

Pahwa R., Pankaj G., Singh M., Piplani M., Lamba A.K., (2012). Nebulizer therapy: a platform for pulmonary drug delivery. *Der Pharmacia Sinica*, 3(6), 630-636

Petersen F.J., (2004). *A new approach for pharmaceutical sprays. Effervescent atomization. Atomizer design and spray characterization*. Ph.D. Thesis. The Danish University of Pharmaceutical Sciences, Department of Pharmaceutics, Kopenhagen

Schlender M., Spengler A., Schuchmann H.P., (2015). High-pressure emulsion formation in cylindrical coaxial orifices: influence of cavitation induced pattern on oil drop size. *Int. J. Multiphase Flow*, 74, 84-95. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.04.004

Sosnowski T.R., (2012). *Aerozole wziewne inhalatory*. Wyd. Pol. Warszawskiej, Warszawa

Sovani S.D., Sojka P.E., Lefebvre A.H., (2001). Effervescent atomization. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 27, 483-521. DOI: 10.1016/S0360-1285(00)00029-0

Praca wykonana w ramach działalności statutowej Politechniki Poznańskiej 03/32/DSMK/0722