

Michał POGORZELSKI, Zygmunt ZANDER, Lidia ZANDER, Maciej WRÓTNIK

e-mail: michal.pogorzelski@uwm.edu.pl

Katedra Inżynierii i Aparatury Procesowej, Wydział Nauki o Żywności, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn

Kinetyka suszenia materiału roślinnego metodą elektrohydrodynamiczną (EHD)

Wstęp

Odwadnianie materiału roślinnego i produktów spożywczych należy do najbardziej skutecznych metod utrwalania żywności. Tradycyjne suszenie konwekcyjne wiąże się jednak ze stosowaniem powietrza o wysokiej temperaturze, co ma wpływ na jakość produktu. Obiecującą alternatywą dla rozwiązań klasycznych jest wykorzystanie efektu elektrohydrodynamicznego EHD (*ElectroHydroDynamic*) i prowadzenie procesu suszenia w polu elektrostatycznym [Bajgai i in., 2006].

Wykazano, że przyłożenie odpowiednio wysokiego napięcia do elektrod silnie różniących się promieniem krzywizny powoduje tzw. wyładowanie koronowe, prowadzące do jonizacji składników powietrza [Ahmedou i in., 2009]. Powstaje wówczas wiatr jonowy sprzyjający wzrostowi intensywności konwekcyjnego ruchu ciepła i masy [Balcer i Lai, 2004; Goodenough i in., 2007].

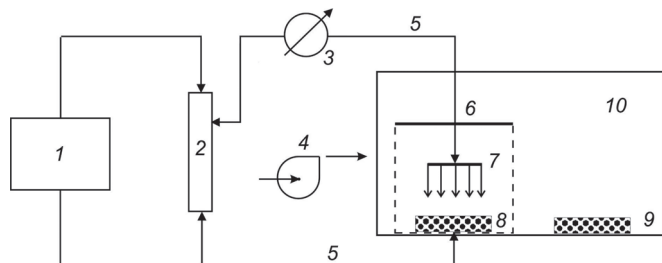
Możliwość wykorzystania tego zjawiska wykazano zarówno w stosunku do odparowywania wody z układu modelowego [Balcer i Lai, 2004], jak i z szeregu surowców naturalnych, m.in. plasterów jabłek [Hashinaga i in., 1999], pszenicy [Cao i in., 2004], plasterów pomidora [Esehaghbeygi i Basiry, 2011].

Z uwagi na fakt generowania wiatru jonowego w powietrzu o ciśnieniu atmosferycznym w temperaturze pokojowej omawiana technika może budzić szczególne zainteresowanie w odniesieniu do suszenia wrażliwych na ciepło materiałów pochodzenia biologicznego [Lai i Lai, 2002].

Celem pracy było zbudowanie stanowiska doświadczalnego i ocena szybkości odwadniania materiału roślinnego w polu elektrycznym przy słabym przepływie powietrza o temperaturze pokojowej oraz określenie najkorzystniejszej polaryzacji elektrody igłowej do prowadzenia procesu suszenia.

Część eksperymentalna

Stanowisko doświadczalne przedstawiono schematycznie na rys. 1. Elektroda wysokonapięciowa składała się z 7 lub 102 igieł metalowych, aluminiowa szalka z próbką materiału kontaktowała się z uziemionym ekranem komory suszarki. Odległość ostrzy igieł od powierzchni płaskiej elektrody wynosiła średnio 9,3 mm.



Rys. 1. Schemat stanowiska doświadczalnego: 1 – zasilacz wysokiego napięcia, 2 – dzielnik wysokiego napięcia, 3 – mikroamperomierz, 4 – wentylator, 5 – przewody wysokonapięciowe, 6 – ekranowanie komory suszarki, 7 – elektroda wysokonapięciowa, 8 – badana próbka, 9 – próbka odniesienia, 10 – tunel suszarki

Materiały. Suszeniu poddawano rozdrobnione próbki miększu jabłka, korzenia marchwi i pędów miskanta olbrzymiego. Równoległe z próbką suszoną w polu elektrycznym w tunelu suszarki umieszczano próbkę kontrolną odwadnianą konwekcyjnie strumieniem powietrza o temperaturze pokojowej ($20,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$, $\phi = 40\text{--}45\%$) przepływającego ze średnią prędkością $0,1\text{ m s}^{-1}$.

Metodyka. W przeprowadzonych doświadczeniach stosowano napięcie $3,7\text{--}4,9\text{ kV}$ o zróżnicowanej charakterystyce biorąc pod uwagę: prąd stały o dodatniej i ujemnej polaryzacji elektrody igłowej, prąd prostowany dwupołkowo i prąd zmienny 50 Hz . Szczegółowe dane zamieszczono w tab. 1.

Tab. 1. Zakres przeprowadzonych doświadczeń

Nr dośw.	Polaryzacja elektrody igłowej	Liczba igieł	Napięcie U [kV]	Prąd ulotu i [μA]	Suszony materiał
1	dodatnia	102	4,9	3	jabłko
2		7	4,9	38	miskant
3		7	4,5	14	marchew
4	ujemna	7	4,5	47	marchew
5	dwupołkowa	7	3,7	17	marchew
6	przebiegowa	7	4,0	30	marchew

Wyniki i dyskusja

W tab. 2 podano warunki prowadzenia procesów suszenia uzyskane we wszystkich doświadczeniach w powiązaniu z pozostałymi, kontrolowanymi parametrami procesu. Suszenie próbek przebiegało przy natężeniu pola elektrycznego E w przedziale $398\text{--}527\text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$, a więc w warunkach porównywalnych z danymi literaturowymi [Cao i in., 2004; Ahmedou i in., 2009].

Tab. 2. Efekty suszenia i pobór energii elektrycznej w przeprowadzonych eksperymentach

Nr dośw.	E [kV m^{-1}]	L [kJ kg_A^{-1}]	Wilgotność X [$\text{kg}_A \text{kg}_{TS}^{-1}$]		
			początkowa	końcowa	
				kontrolna	EHD
1	527	90,8	5,897	5,768	5,693
2	527	719,7	1,857	1,761	1,666
3	484	192,3	8,091	7,653	6,144
4	484	511,2	8,006	7,557	5,955
5	398	174,0	8,179	7,699	6,259
6	430	723,2	7,851	7,541	7,138

Ze względu na stosunkowo mały zakres zmian wilgotności próbek poszczególnych materiałów podczas doświadczeń trwających $42\text{--}90\text{ min}$. przebiegi krzywych suszenia (Rys. 2 i 3) aproksymowano funkcją liniową, a wartości liczbowe współczynnika regresji b_1 przyjęto za oszacowanie szybkości suszenia w , definiowanej wg Strumilly [1983] jako:

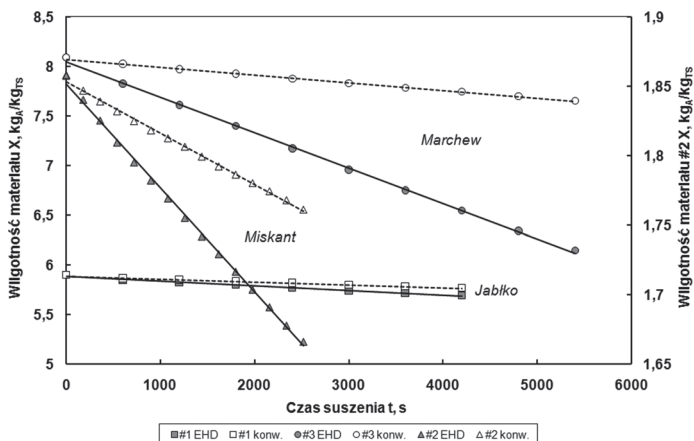
$$w = -m_{TS} \frac{dX}{A d\tau} \quad (1)$$

gdzie:

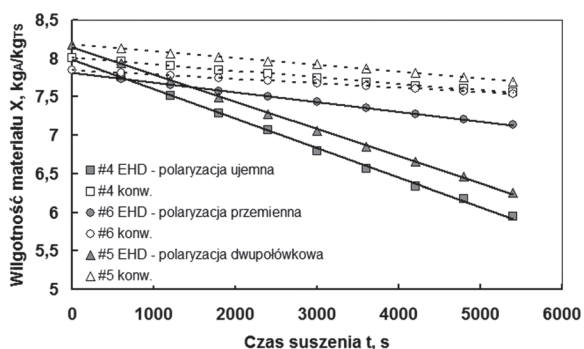
- A – powierzchnia parowania, [m^2]
- X – wilgotność materiału, [$\text{kg}_A \cdot \text{kg}_{TS}^{-1}$]
- m_{TS} – masa suchej substancji [kg]
- w – szybkość suszenia, [$\text{kg}_A \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]
- τ – czas, [s]

Oceny parametrów równań regresji $X = f(\tau)$ zamieszczono w tab. 3.

Szybkość suszenia w zmieniała się w przedziale $(2,91\text{--}8,55) \cdot 10^{-5}\text{ kg m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ w procesach konwekcyjnych i $(4,64\text{--}38,18) \cdot 10^{-5}\text{ kg m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ w procesach wspomaganych EHD. Stwierdzono przy tym zróżnicowanie poboru energii elektrycznej L na odparowanie jednostki masy wilgoci z próbki w zakresie $90\text{--}720\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. We wszystkich przypadkach w polu elektrycznym szybkość suszenia w_{EHD} była większa niż w warunkach procesu konwekcyjnego w_{konw} .



Rys. 2. Krzywe suszenia próbek nr 1-3 w polu elektrostatycznym (EHD) przy dodatniej polaryzacji elektrody igłowej i w warunkach procesu konwekcyjnego (konw.)



Rys. 3. Krzywe suszenia marchwi (doświadczenia nr 4-6) w polu elektrycznym (EHD) i w warunkach procesu konwekcyjnego (konw.) – wpływ różnej polaryzacji elektrody igłowej

Tab. 3. Oszacowania współczynników równań regresji typu $X = b_0 + b_1 \tau$

Nr dośw.	Suszenie konwekcyjne			Suszenie EHD		
	b_0	$10^5 b_1$	r^2	b_0	$10^5 b_1$	r^2
1	5,887	-2,907	0,987	5,883	-4,644	0,990
2	1,853	-3,717	0,997	1,852	-7,483	0,998
3	8,073	-7,921	0,997	8,049	-35,81	0,999
4	8,005	8,493	0,998	7,980	-38,18	0,998
5	8,818	-8,855	0,999	8,147	-35,40	0,999
6	7,847	-5,668	0,999	7,818	-12,77	0,996

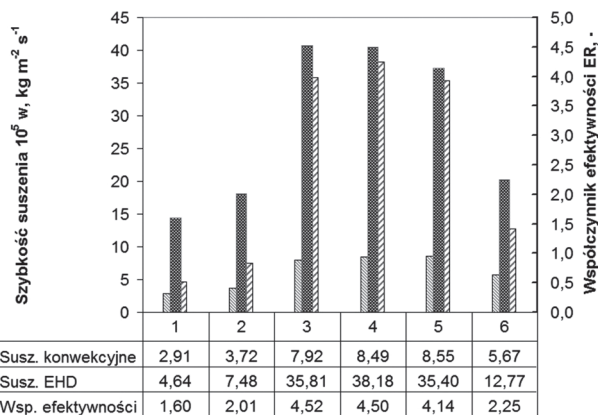
Miarą intensywności wpływu pola elektrycznego na szybkość suszenia jest współczynnik efektywności ER [Goodenough i in., 2007]:

$$ER = \frac{W_{EHD}}{W_{konw}} \quad (2)$$

który wyniósł od 1,60 do 4,52. Zróznicowanie szybkości suszenia w poszczególnych eksperymentach i efekt intensyfikacji procesu przez pole elektryczne zilustrowano na rys. 4. Najślabszy efekt EHD odnotowano podczas suszenia próbek jabłka oraz miskanta. W pierwszym przypadku zaobserwowano bardzo mały prąd ulotu i zastosowano elektrodę o odmiennym kształcie. W przypadku miskanta materiał odznaczał się stosunkowo niską wilgotnością początkową.

W dalszych badaniach niezbędne będzie ustalenie związku między intensyfikacją procesu suszenia w procesie EHD a geometrią rozstawienia igieł elektrody i właściwościami suszonego materiału. Najwyższe wartości ER osiągnęto podczas suszenia marchwi. Ładunek elektrody igłowej praktycznie nie miał wpływu na wielokrotność szybkości parowania wilgoci, ale przy polaryzacji dodatniej obserwowano występowanie skłonności do wyładowań iskrowych, wobec czego polaryzację ujemną uznano za bardziej korzystną.

Intensyfikację procesu suszenia przypisuje się efektowi naruszenia granicznej warstwy powietrza przy powierzchni próbki przez strumień wiatru jonowego w warunkach, kiedy prędkość wiatru jonowego jest



Rys. 4. Szybkości suszenia próbek w polu elektrostatycznym (EHD) i w warunkach procesu konwekcyjnego (konw.) oraz współczynnik efektywności ER

większa od prędkości powietrza w przepływie krzyżowym [Ahmedou i in., 2009, Goodenough i in. 2007]. Prędkość wiatru jonowego generowanego przez pojedynczą elektrodę igłową teoretycznie zależy od natężenia pola elektrycznego i odległości między ostrzem i elektrodą płaską [Ahmedou i wsp., 2009, Goodenough i wsp. 2007]:

$$u = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\rho}} E \quad (3)$$

gdzie:

E – natężenie pola elektrycznego [$V \cdot m^{-1}$]

u – prędkość wiatru jonowego [$m \cdot s^{-1}$]

ϵ_0 – przenikalność elektryczna powietrza

Obliczone z równania (3) prędkości wiatru jonowego wynosiły od 1,09 do 1,45 $m \cdot s^{-1}$ wobec prędkości przepływu krzyżowego równej 0,1 $m \cdot s^{-1}$. Relacja ta dowodzi, że pomimo zastosowania niższego napięcia w porównaniu z warunkami eksperymentów przedstawianych w cytowanych publikacjach osiągnięto znaczące zwiększenie szybkości suszenia.

Wnioski

Zastosowanie pola elektrycznego może powodować przeszło czterokrotne zwiększenie szybkości suszenia materiałów o dużej wilgotności.

Najkorzystniejsze rezultaty daje ujemna polaryzacja elektrody igłowej.

W dalszych eksperymentach konieczna jest optymalizacja geometrii elektrody wieloigłowej oraz określenie związku między intensyfikacją procesu suszenia i aktywnością wody w suszonym materiale.

LITERATURA

- Ahmedou S.A.O., Rouaud O., Havet M., 2009. Assessment of the hydrodynamic drying process. *Food Bioprocess. Tech.*, **2**, 240-247. DOI: 10.1007/s11947-008-0078-6
- Bajgai T.R., Raghavan G.S.V., Hashinaga F., Ngadi M.O., 2006. Electrohydrodynamic drying – A concise overview. *Drying Tech.*, **24**, nr 7, 905-910. DOI: 10.1080/07373930600734091
- Balcer B.E., Lai F.C., 2004. EHD-Enhanced drying with multiple-wire electrode. *Drying Technol.*, **22**, nr 4, 821-836. DOI: 10.1081/DRT-120034265
- Cao W., Nishiyama Y., Koide S., 2004. Electrohydrodynamic drying characteristics of wheat using high voltage electrostatic field. *J. Food Eng.*, **62**, nr 3, 209-213. DOI: 10.1016/S0260-8774(03)00232-2
- Esehaghbeygi A., Basiry M., 2011. Electrohydrodynamic (EHD) drying of tomato slices (*Lycopersicon esculentum*). *J. Food Eng.*, **104**, nr 4, 628-631. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2011.01.032
- Goodenough T.I.J., Goodenough P.W., Goodenough S.M., 2007. The efficiency of corona wind drying and its application to the food industry. *J. Food Eng.*, **80**, nr 4, 1233-1238. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.09.016
- Hashinaga F., Bajgai T.R., Isobe S., Barthakur N.N., 1999. Electrohydrodynamic drying (EHD) of apple slices. *Drying Technol.*, **17**, nr 3, 479-495. DOI: 10.1080/07373939908917547
- Lai F.C., Lai K.-W., 2002. EHD-Enhanced drying with wire electrode. *Drying Tech.*, **20**, nr 7, 1393-1405. DOI: 10.1081/DRT-120005858
- Strumiłło Cz., 1983. *Podstawy teorii i techniki suszenia*. WNT, Warszawa