

EWA GONDEK
EWA JAKUBCZYK

Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, Wydział Nauk o Żywności, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa

Wpływ grubości warstwy na wydajność i kinetykę procesu suszenia konwekcyjnego spienionego przecieru owocowego

Wstęp

Suszenie pianowe umożliwia uzyskanie w stosunkowo krótkim czasie sproszkowanej żywności o dobrych cechach jakościowych. W ostatnich latach gama produktów, do których stosowana jest ta technika suszenia znacznie się poszerzyła. W stanie spienionym suszono takie produkty jak: soki i puree z owoców [1–6], pastę z bobiku [7], mleko sojowe [8] oraz ekstrakty i koncentraty kawy, herbaty, ziół [9] i wiele innych.

Otwarta struktura piany, stwarza dobre warunki dla ruchu masy w czasie suszenia, a co za tym idzie suszenie materiału w stanie spienionym pozwala na uzyskanie znacznych szybkości procesu. Suszenie pianowe wymaga jednak optymalizacji zarówno samego procesu spieniania (technika spieniania, rodzaj i ilość substancji pianotwórczych i stabilizujących pianę), jak i warunków suszenia (temperatura czynnika, prędkość przepływu czynnika suszącego, grubość warstwy materiału). *Jakubczyk* i *Gondek* [10] badały wpływ temperatury suszenia spienionego przecieru jabłkowego na kinetykę procesu, *Sankat* i *Castaigne* [5] analizowali wpływ temperatury suszenia spienionego przecieru z bananów (z zakresu 45–90°C) i grubości warstwy materiału, podobnie *Thuwapanichayanan* i wsp. [11] badali proces suszenia pianowego puree bananowego w różnych temperaturach. *Lewicki* [12] badał wpływ temperatury i prędkości powietrza oraz grubości warstwy, jak i niektórych cech piany na przebieg procesu suszenia konwekcyjnego spienionego koncentratu pomidorowego.

Wszyscy badacze, którzy porównywali suszenie materiału w postaci piany i niespienionego podkreślają, że zastosowanie spieniania materiału suszonego pozwala nie tylko na znaczne skrócenie czasu suszenia, ale również daje możliwość uzyskania produktu o cechach instant [1, 4, 5, 10, 12].

Celem niniejszej pracy była analiza procesu suszenia spienionego przecieru jabłkowego w temperaturze 60°C przy zróżnicowanej grubości warstwy wynoszącej od 1 do 12 mm.

Metodyka

Przecier jabłkowy (16,5 Brix), spieniano za pomocą ręcznego miksera laboratoryjnego z dodatkiem 2% albuminy i 0,5% metylocelulozy. Uzyskaną pianę o gęstości 0,31 ± 0,01 g/cm³ nakładano na tacę aluminiową o wymiarach 16 × 13,5 cm i suszono w suszarce konwekcyjnej w temperaturze 60 °C przy prędkości powietrza 1,2 m/s. Grubość warstwy materiału poddawanego suszeniu (*h*) wynosiła kolejno 1, 2, 4, 6, 8 i 12 mm. W czasie suszenia rejestrowano zmiany masy suszonego materiału za pomocą wagi (*Radwag*) oraz temperatury

powietrza suszącego i materiału (termopary *Czaki Thermo-Product* podłączone do skanera MPI-LAB firmy *Metronic Instruments*). Każdy eksperyment wykonywano w trzech powtórzeniach. Suszenie prowadzono do uzyskania stałej masy, masę suszonego materiału rejestrowano z dokładnością do 0,1g za pomocą programu komputerowego *Pomiar dla DOS (Axis)*.

W materiale mokrym i suszu określono zawartość wody (metodą suszenia pod obniżonym ciśnieniem w 70°C przez 24 godziny) i aktywność wody (w aparacie *Rotronic-Hygroscop DT*).

Na podstawie ubytków masy w czasie suszenia wykreślono krzywe suszenia, w funkcji względnej zawartość wody w czasie

$$MR = \frac{u - u_r}{u_o - u_r} \quad (1)$$

gdzie:

- MR – bezwymiarowa względna zawartość wody;
- u* – zawartość wody w czasie suszenia, [kg/kg s.s];
- u_o* – początkowa zawartość wody, [kg/kg s.s];
- u_r* – równowagowa zawartość wody, [kg/kg s.s], wyznaczona na podstawie wilgotności końcowej materiału.

Do opisu krzywych suszenia zastosowano równanie *Midilliego* i wsp. [13], które według danych literaturowych nadaje się do opisu suszenia konwekcyjnego materiałów spienionych

$$MR = a \exp(-kt^n) + bt \quad (2)$$

gdzie:

- MR – względna zawartość wody;
- k* – współczynnik suszarniczy [min⁻¹],
- n* – eksponent;
- t* – czas, [min];
- a* i *b* – współczynniki równania.

Wykreślono krzywe suszenia i szybkości suszenia stosując analizę regresji przy wykorzystaniu programów *Table Curve 2D* i *Statgraphics Plus 5.0*. Analiza statystyczna wyników obejmowała jednoczynnikową analizę wariancji z zastosowaniem testu *Tukeya*, przy $\alpha = 0,05$. Dodatkowo wyznaczono wartość średniego błędu kwadratowego, który służył jako kryterium dopasowania modelu do danych eksperymentalnych.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{i,p} - MR_{i,0})^2}{N}} \cdot 100\% \quad (3)$$

$MR_{i,p}$ – obliczona na podstawie modelu względna zawartość wody,

$MR_{i,e}$ – wyznaczona eksperymentalnie względna zawartość wody,

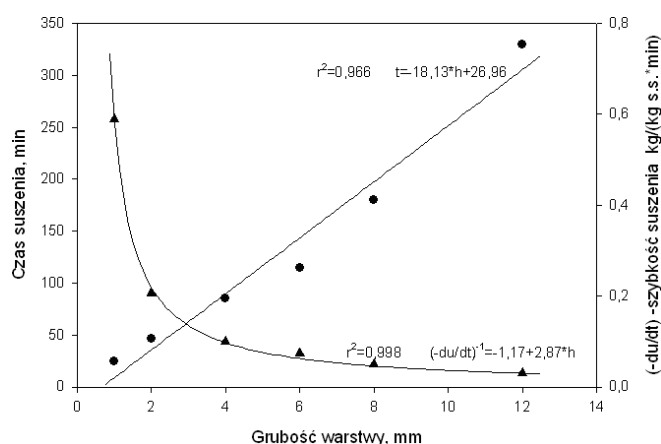
N – liczba prób.

Wyniki i omówienie

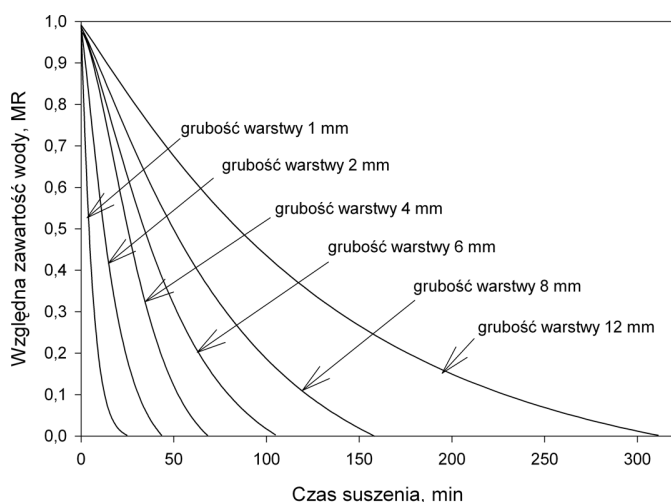
Suszenie prowadzono w temperaturze 60°C, którą uznano za optymalną z punktu widzenia szybkości suszenia spienionego przecieru jabłkowego w ramach innej pracy [5], parametry spieniania oraz dodatek albuminy i metylocelulozy poddano optymalizacji w trakcie badań wstępnych.

Uzyskane w pracy krzywe suszenia przecieru spienionego przy tej samej grubości warstwy, jako kolejne powtórzenia, nie różniły się istotnie, dlatego na kolejnych rysunkach prezentowano krzywe przykładowe dla każdej grubości warstwy materiału.

Ze wzrostem grubości warstwy materiału suszonego rośnie czas suszenia, jest to zależność wprost proporcjonalna (Rys. 1), podobnie *Sankat* i *Castaigne* [16] susząc puree z bananów w warstwach o grubości 5, 10, 15 i 20 mm stwierdzili, że czas suszenia jest wprost proporcjonalny do grubości warstwy suszonego materiału.



Rys. 1. Zależność czasu suszenia i szybkości suszenia spienionego przecieru jabłkowego od początkowej grubości warstwy materiału



Rys. 2. Krzywe suszenia konwekcyjnego spienionego przecieru jabłkowego przy grubościach warstwy materiału suszonego 1, 2, 4, 6, 8 i 12 mm

Tablica 1
Stałe równania *Midilliego* i wsp. [13]

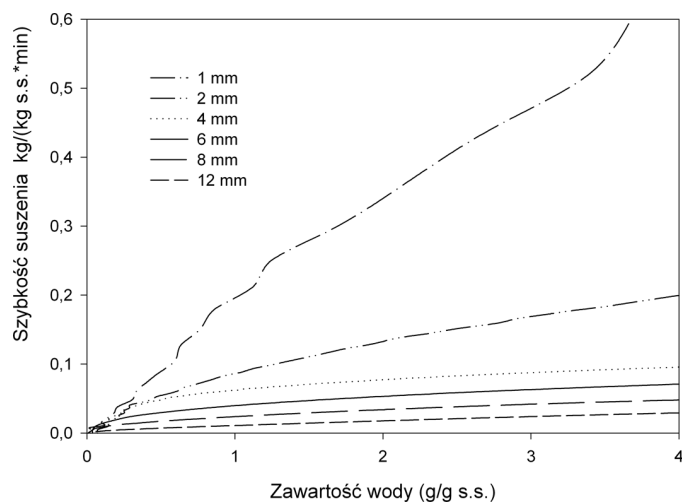
Grubość warstwy [mm]	Współczynniki r. <i>Midilliego</i>				Ocena dopasowania modelu			
	k	n	a	b	RMS	FSE	F_{stat}	r^2
1	0,137	1,101	0,993	$2,8 \cdot 10^{-4}$	3,45%	0,015	3094	0,998
2	0,030	1,222	0,983	$-0,1 \cdot 10^{-4}$	5,45%	0,007	26736	0,999
4	0,005	1,534	0,978	$-4,8 \cdot 10^{-4}$	4,45%	0,002	10678	0,998
6	0,007	1,283	0,986	$-6,0 \cdot 10^{-4}$	6,87%	0,010	20313	0,999
8	0,006	1,154	0,986	$-5,8 \cdot 10^{-4}$	3,65%	0,009	29494	0,999
12	0,005	1,072	0,991	$-2,3 \cdot 10^{-4}$	2,98%	0,007	95470	0,999

Krzywe suszenia przecieru jabłkowego przedstawiono w układzie względna zawartość wody (MR) – czas i opisano równaniem zaproponowanym przez *Midilliego* i wsp. [13]. W tabeli 1 zaprezentowano wyniki przeprowadzonej analizy regresji zmian względnej zawartości wody w czasie suszenia charakteryzujące dopasowanie tego modelu. Dla badanych w pracy warunków suszenia uzyskano wysokie wartości R^2 od 0,998 do 0,999 i F_{stat} oraz niskie wartości FSE (odchylenie standardowe składnika resztowego). Obliczony średni błąd kwadratowy RMS , był mały i w żadnym z analizowanych przypadków nie przekraczał kilku procent. Przydatność tego modelu do opisu procesu suszenia spienionego przecieru jabłkowego metodą owiewową i mikrofalowo-konwekcyjną wykazała również *Jakubczyk* [14].

Przebieg procesu suszenia spienionego przecieru jabłkowego zależał od grubości warstwy suszonego materiału. W suszeniu spienionego przecieru jabłkowego o małych grubościach warstwy 1 i 2 mm I okres suszenia nie występował. Przy grubościach warstwy 4–8 mm występowanie I okresu suszenia na krzywych kinetycznych nie jest jednoznaczne, w zależności od zastosowanego do opisu eksperymentu modelu etap stałej szybkości suszenia może być widoczny, natomiast przy grubości warstwy 12 mm występuje wyraźny podział na I i II okres suszenia.

Przy grubości warstwy wynoszącej 12 mm, w początkowym etapie suszenia, zawartość wody zmniejsza się liniowo (Rys. 2) a na krzywych szybkości suszenia (Rys. 3) widoczny jest etap, w którym szybkość suszenia jest stała, niezależna od zawartości wody. Etap ten odpowiada pierwszemu okresowi suszenia, który wiąże się z usuwaniem z materiału tzw. wody swobodnej. Występowanie pierwszego okresu suszenia w suszeniu pianowego soku jabłkowego stwierdzili: *Kudra* i *Ratti* [4] i *Jakubczyk* i *Wnorowska* [1] oraz *Lewicki* [12] dla koncentratu pomidorowego. Etap ten nie występował w suszeniu takich surowców jak, spienione puree z mango i bananów [5, 15], puree z karamboli [3] i mleko [16].

Szybkości suszenia uzyskane w pracy zależą od grubości suszonej warstwy, najwyższe wartości szybkości suszenia na początku procesu uzyskano dla materiału suszonego w 1 mm warstwie (Rys. 1). Wzrost grubości warstwy do 2 mm powodował prawie 3-krotny spadek szybkości suszenia, materiał w warstwie 4 mm suszył się z szybkością 6-krotnie mniejszą niż w warstwie 1 mm, przy dalszym zwiększaniu grubości warstwy szybkość suszenia malała jednak różnice pomiędzy wartościami uzyskanymi dla grubości 6, 8 i 12 mm. nie były tak duże jak przy małych grubościach. Przy grubościach warstwy 1 i 2 mm występują jednocześnie: duża szybkość usuwa-



Rys. 3. Krzywe szybkości suszenia spienionego przecieru jabłkowego suszonego w warstwach o różnych grubościach

nia wody z materiału i krótki czas suszenia (Rys. 1). Obliczona wydajność procesu wyrażona w g suszu uzyskanego w czasie 1 godziny z jednostki powierzchni suszarki jest najwyższa przy grubości warstwy 2 mm (Tabl. 2), co oznacza, że dla suszenia pianowego przecieru jabłkowego jest to optymalna grubość warstwy. Beristain i wsp. [9] stwierdzili, że proces suszenia pianowego ekstraktu z hibiskusa przebiegał efektywnie przy 4 mm warstwie materiału.

Grubość warstwy suszonej piany w zakresie 1–12 mm nie wpływa na zawartość wody w suszu. Zawartości wody i aktywności wody w suszu uzyskanym przy różnych grubościach warstwy suszonej piany zawierały się w przedziale 1,39–2,36 g/g s.s., $a_w = 0,104$ – $0,179$ i nie różniły się istotnie statystycznie, ich wartości podano w tablicy 2.

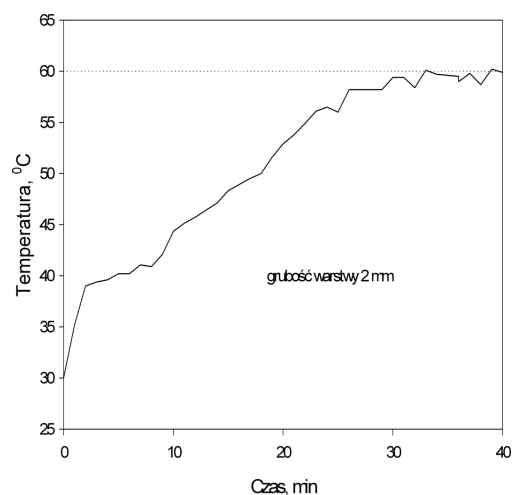
Tablica 2

Wilgotność i aktywność wody suszu oraz wydajność procesu suszenia przy różnych grubościach warstwy spienionego materiału

Grubość warstwy [mm]	Zawartość wody w suszu, [g/ g s.s.]	Aktywność wody suszu w temp. $25 \pm 1,5^\circ\text{C}$	Wydajność suszenia [g/h m ²]
1	2,36±0,08	0,150±0,017	106,15
2	2,15±0,25	0,129±0,015	144,23
4	2,09±0,37	0,104±0,009	137,22
6	1,39±0,19	0,106±0,007	134,69
8	2,36±0,08	0,179±0,011	133,03
12	2,36±0,08	0,152±0,022	101,61

W celu określenia, czy suszenie przebiega dwuetapowo: ze stałą, a następnie malejącą szybkością suszenia stosuje się pomiary temperatury materiału suszonego. W pierwszym okresie suszenia ciepło dostarczone do suszonego materiału jest wykorzystywane do odparowania wody z powierzchni materiału, suszony materiał przez cały ten czas nie zmienia swojej temperatury (nie nagrzewa się). Temperatura materiału w I okresie suszenia jest stała i odpowiada temperaturze termometru mokrego. Dopiero po przekroczeniu tzw. krytycznej zawartości wody zaczyna dominować opór ruchu wody wewnątrz materiału, woda z głębszych warstw przemieszcza się na powierzchnię materiału, a temperatura materiału stopniowo rośnie, w końcowym etapie procesu, kiedy materiał osiąga wilgotność równowagową temperatura materiału

zbliża się do temperatury medium suszającego [17]. Krzywe temperaturowe uzyskane w pracy (Rys. 4) wskazują, że o typowym dwuetapowym przebiegu procesu suszenia możemy mówić w przypadku warstwy 12 mm, w pozostałych grubościach na krzywych temperaturowych nie występuje wyraźny etap stałej temperatury. Przy grubościach warstwy poniżej 12 mm temperatura materiału w ciągu procesu suszenia stopniowo rośnie osiągając temperaturę powietrza suszającego, można więc sądzić, że materiał suszy się tylko w okresie malejącej szybkości suszenia.



Rys. 4. Przebieg zmian temperatury materiału w czasie suszenia

Przebieg procesu ma istotne znaczenie z praktycznego punktu widzenia, dokładna znajomość mechanizmu usuwania wody z materiału jest niezbędna na etapie projektowania procesu. Intensyfikacja suszenia w pierwszym okresie wiąże się głównie z obniżeniem oporów konwekcyjnego wnikania wilgoci od powierzchni materiału do gazu (temperatura czynnika suszającego, jego wilgotność, prędkość). Sankat i Castaigne [5], Raharitsifa i wsp. [18] i Komanowsky i wsp. [15] stwierdzili, że wzrost prędkości przepływu powietrza suszającego nie wpływa na szybkość usuwania wody z materiału, co potwierdza tezę o braku pierwszego okresu suszenia. W drugim okresie suszenia intensyfikacja procesu jest trudna, wiąże się ona głównie z odpowiednim przygotowaniem materiału do suszenia, a więc w przypadku suszenia pianowego, grubością warstwy, gęstością piany, sposobem jej uzyskania, rodzajem substancji pianotwórczej itp.

Wnioski

1. Krzywe suszenia konwekcyjnego spienionego przecieru jabłkowego mogą być opisane równaniem zaproponowanym przez *Midilliego* i wsp. [13].
2. Czas suszenia jest wprost proporcjonalny do grubości warstwy suszonego przecieru jabłkowego, szybkość suszenia maleje wraz z grubością warstwy.
3. Przebieg procesu suszenia spienionego przecieru jabłkowego zależy od grubości warstwy suszonego materiału, cienkie warstwy piany suszyły się z malejącą szybkością suszenia, suszenie warstwy 12 mm przebiegało dwuetapowo: ze stałą i malejącą szybkością suszenia.
4. Optymalna z punktu widzenia wydajności procesu grubość warstwy spienionego materiału to 2 mm.

LITERATURA

1. *E. Jakubczyk, E. Wnorowska*: *Żyw. Nauk. Tech. Jak.* **59** nr 4, 195 (2008).
2. *S. Jaya, H. Das*: *J. Food. Eng.* **63**, 125 (2004).
3. *A. Karim, C. Ch. Wai*: *Food Hydrocoll.* **13**, 203 (1999).
4. *T. Kudra, C. Ratti*: *Can. Biosys. Eng.* **48**, nr 3, 27 (2006).
5. *C.K. Sankat, F. Castaigne*: *Lebensm. Wiss. u. Techn.* **37**, 517 (2004).
6. *S.K. Sharma, P.C. Sharma, B.B.L. Kaushal*: *J. Food. Sci. Techn.* **41** nr 1, 9 (2004).
7. *K.O. Falade, K.I. Adeyanju, P.I. Uzo-Peters*: *Eur. Food. Res. Tech.* **217**, 486 (2003).
8. *O.A. Akintoye, A.O. Oguntund.*: *Drying Techn.* **9**, nr 1, 245 (1991).
9. *C. I. Beristain, H. S. Garcia, A. Vazquez*: *Drying Techn.* **11**, nr 1, 221 (1993).
10. *E. Jakubczyk, E. Gondek*: Budowa i Eksploatacja Maszyn Przemysłu Spożywczego, XXX Konferencja, Olsztyn, dostępne na płycie CD, (2008).
11. *R. Thuwapanichayanan, R. Prachayawarakorn, S. Soponronnarit*: *J. Food Eng.* **86**, 573 (2008).
12. *P.P. Lewicki*: *Zesz. Nauk. AR Warsz.*, **55**, 1 (1975).
13. *A. Midilli, H. Kucuk, Z. Yapar*: *Drying Techn.*, **20**, 1503 (2002).
14. *E. Jakubczyk*: *Żyw. Nauk. Tech. Jak.* w druku, (2009).
15. *P. Rajkumar, R. Kailappan, R. Viswanathan, G. S. V. Raghavan*: *J. Food Eng.* **79**, 1452 (2007).
16. *M. Komanowsky, H. I., Sinnamon, N.C. Aceto*: *Ind. Eng. Chem.* **3** nr 3, 193 (1964).
17. *P.P. Lewicki*: Inżynieria i aparatura przemysłu spożywczego, Warszawa, WNT 1999.
18. *N. Raharitsifa C. De Varennes, C. Ratti*: Intern. Conf. Eng. Food, Canada, materiały dostępne na płycie CD, (2003).

Praca finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2007-2009 jako projekt badawczy nr N312247833.