

ANALIZA PRZEBIEGU KRZYWYCH TEMPERATUROWYCH PODCZAS SUSZENIA KONWEKCYJNEGO JABŁEK

Lesław Janowicz

Instytut Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa w Warszawie

Wstęp

Analiza przebiegu procesów cieplnych w przemyśle owocowo-warzywnym wskazuje na konieczność uwzględniania właściwości cieplnych przetwarzanych surowców, półproduktów i produktów. Zależą one w dużej mierze od składu chemicznego oraz budowy tkanki roślinnej, specyficznej dla poszczególnych gatunków owoców. Owoce charakteryzują się m.in. różną zawartością powietrza (znajdującego się w przestrzeniach międzykomórkowych), protoplazmy oraz soku komórkowego, co w sposób decydujący określa ich cechy termofizyczne [NICOLAI, DE BAERDEMAEKER 1996]. Powietrze wewnątrz tkanki roślinnej wywiera zasadniczy wpływ na przebieg procesów technologicznych, związanych z obróbką termiczną owoców. W materiałach o zwiększonej porowatości proces przewodzenia ciepła jest znacznie utrudniony, ponieważ współczynniki przewodności cieplnej właściwej dla gazów są o rząd wielkości mniejsze niż dla ciał stałych lub cieczy. Niska przewodność cieplna materiału suszonego powoduje, że występuje zjawisko szybszego odbioru wilgoci z warstw zewnętrznych od jej dyfuzji z części środkowych. Dochodzi wtedy do zaskorupiania się cząstek surowca, ponieważ wysuszona powierzchnia nagrzewa się nadmiernie i zachodzą procesy degradacji termicznej [STANKIEWICZ 1990, 1992]. To sprawia, że istotnym staje się zagadnienie kontroli i oceny efektu nagrzewania surowca podczas suszenia. Obserwacja zmian zawartości wody oraz temperatury powierzchni i wnętrza surowca, wywołanych procesem suszenia, pozwala na rozszerzenie wiedzy z zakresu wymiany ciepła i masy, a także stwarza możliwość optymalizacji procesu pod względem energetycznym.

Cel pracy

Celem pracy było dokonanie analizy wpływu temperatury i prędkości powietrza suszącego na efekt nagrzewania powierzchni i wnętrza suszonego jabłka dla różnych jego form rozdrobnienia (plastry i kostka). Dodatkowo wyznaczono szybkość nagrzewania jabłek dla zmiennych parametrów procesu suszenia.

Materiał i metody

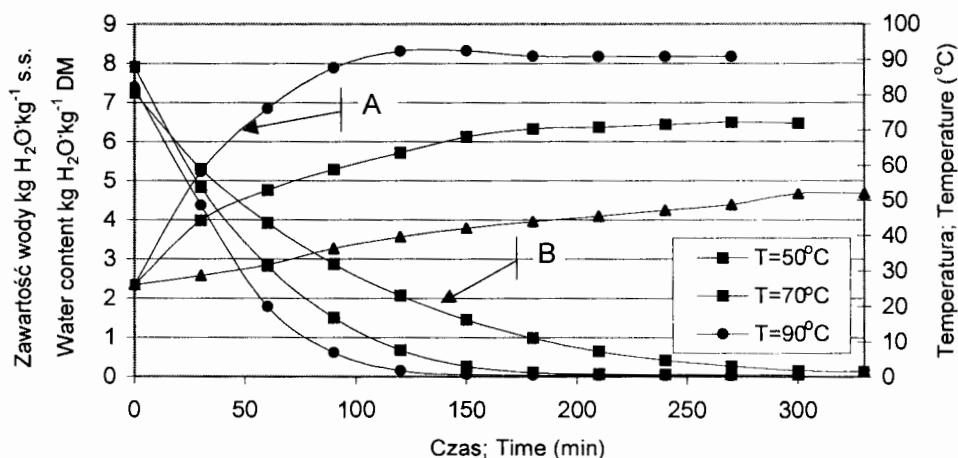
Materiał. Jabłka odmiany 'Bankroft' były krojone za pomocą kraljownicy w plastry o grubości $5 \pm 0,5$ mm, z których następnie wycinano krążki o średnicy $48 \pm 0,5$ mm, pozbawione części nasiennej oraz skórki, w przypadku kostki sześcienniej bok miał wymiar $10 \pm 0,5$ mm. Pomiary zawartości wody i temperatury powierzchni krajanki z jabłek były realizowane w trzech powtórzeniach w celu ograniczenia wpływu błędów pomiarowych.

Badanie kinetyki suszenia oraz zmian temperatury powierzchni i wnętrza jabłek. Eksperymentalne badania suszenia krajanki z jabłek przeprowadzono w instalacji suszarniczej do badań w warunkach konwekcji wymuszonej [KAMIŃSKI i in. 1998]. Badania przeprowadzono dla następujących temperatur czynnika suszącego: 45, 50, 55, 65, 70 i 90°C oraz prędkości powietrza wynoszącej 0,4 i 1,5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pomiary dokonano przy zachowaniu stałej wartości wilgotności względnej powietrza wynoszącej 40%.

Stanowisko badawcze do suszenia w warunkach konwekcji wymuszonej wyposażono dodatkowo w głowicę pomiarową, która umożliwiała pomiary temperatury wnętrza i powierzchni suszonej krajanki w ciągu całego procesu [KAMIŃSKI i in. 1999].

Wyniki i dyskusja

Na rys. 1 przedstawiono zmiany zawartości wody kostki z jabłek w czasie suszenia w temperaturach 50, 70 i 90°C przy zachowaniu stałej prędkości powietrza suszącego. Bez względu na temperaturę suszenia przebiegają one w zakresie malejących zawartości wody. Jednocześnie zmiana temperatury suszenia z 50°C do 90°C spowodowała skrócenie czasu suszenia o około 70%.

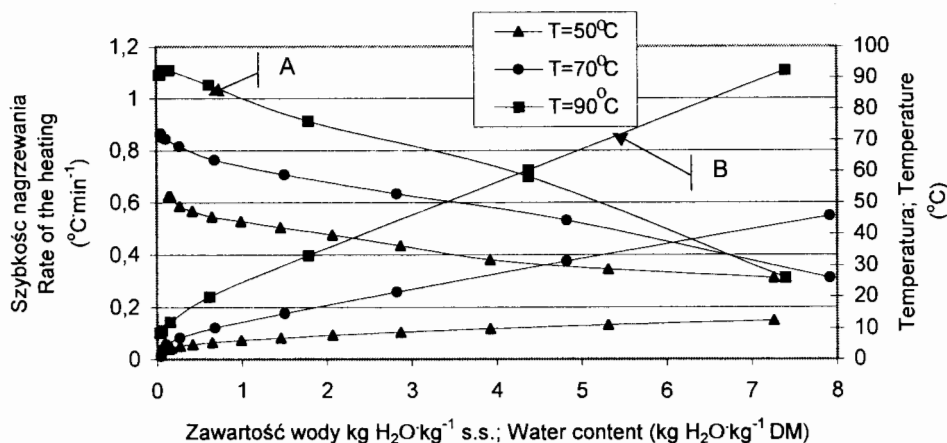


Rys. 1. Zmiany zawartości wody i temperatury powierzchni kostki z jabłek w funkcji czasu suszenia, A – krzywa temperaturowa, B – krzywa suszenia

Fig. 1. Changes of water content and temperature of apple surface cubes as a function of drying time, A – temperature curve, B – drying curve

W wyniku przeprowadzonych badań zaobserwowano istotny wpływ temperatury suszenia na przebieg krzywych temperaturowych (rys. 1). Podwyższenie temperatury suszenia konwekcyjnego skraca czas, po którym jabłka dochodzą do tej samej zawartości wody oraz temperatury powierzchni.

Na rys. 2 przedstawiono krzywe szybkości nagrzewania kostki z jabłek wyznaczone dla różnych temperatur suszenia. Pozwalają zaobserwować spadek szybkości nagrzewania wraz ze zmniejszaniem się zawartości wody w trakcie procesu suszenia. Szybkość nagrzewania maleje od około $1,11^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ do 0 dla temperatury suszenia 90°C , od około $0,55^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ dla temperatury 70°C i od około $0,15^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ dla 50°C .



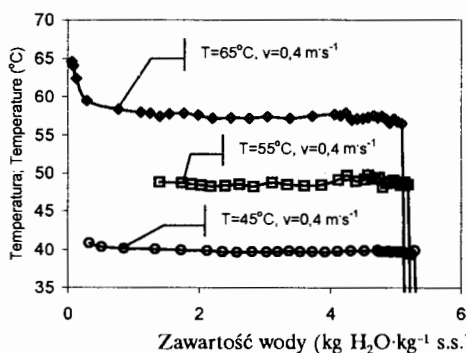
Rys. 2. Zmiany szybkości nagrzewania i temperatury powierzchni kostki z jabłek w funkcji zawartości wody, A – krzywa temperaturowa, B – krzywa szybkości nagrzewania

Fig. 2. Changes the rate of heating and temperature of surface apple of cubes as a function of the water content, A – temperature curve, B – curve of the rate of heating

Zmiany zawartości wody i temperatury powierzchni w czasie suszenia kostki z jabłek nie wykazały wyraźnych liniowych przebiegów charakterystycznych dla pierwszego okresu suszenia. Brak stałej szybkości procesu, wynikającej z niezmienniej temperatury powierzchni suszonego materiału, zaobserwowano w badanym zakresie temperatur suszenia. Fakt ten można wyjaśnić występowaniem dużej różnicy temperatury pomiędzy kostkami jabłek a komorą suszarki, co powoduje nakładanie się okresu wstępnego nagrzewania materiału z jednoczesnym odparowaniem wody z powierzchni. Tak szybkiemu początkowemu odparowaniu wilgoci z powierzchni sprzyja niewielki rozmiar kostki oraz stosunkowo duża powierzchnia wymiany ciepła do objętości surowca, dodatkowo efekt ten jest intensyfikowany przez dużą prędkość powietrza suszącego, wynoszącą $1,5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Dalsze badania przeprowadzono na jabłkach krojonych w plastry.

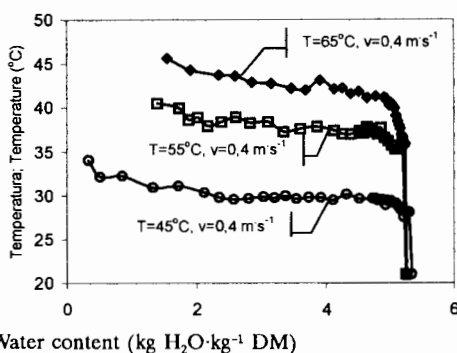
Na rysunku 3 i 4 przedstawiono zmiany temperatury powierzchni i wnętrza suszonego plastra dla trzech temperatur powietrza suszącego. Wzrost temperatury powietrza suszącego w znaczny sposób intensyfikuje zjawisko dyfuzji wody, skracać efektywny czas suszenia.



v – prędkość powietrza suszącego; hot air velocity

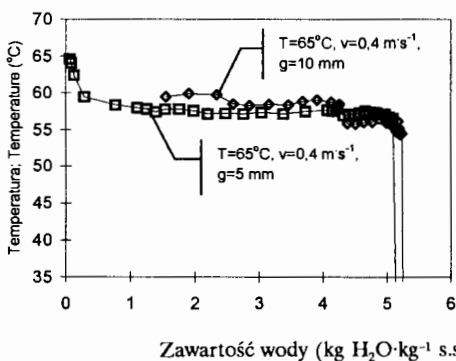
Rys. 3. Zmiany temperatury (T) powierzchni plastra jabłka w funkcji zawartości wody

Fig. 3. Changes of temperature (T) of surface of apple slices as a function of water content



Rys. 4. Zmiany temperatury (T) wnętrza plastra jabłka w funkcji zawartości wody

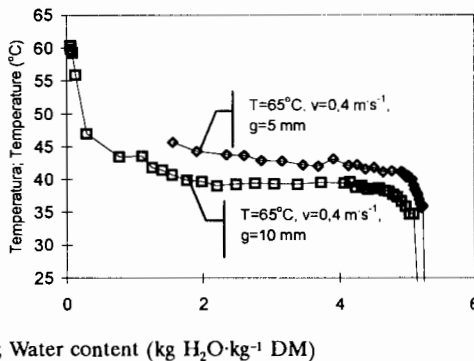
Fig. 4. Changes of temperature (T) of interior apple of slices as a function of water content



v – prędkość powietrza suszącego; hot air velocity
 g – grubość plasterów; thickness of slices

Rys. 5. Zmiany temperatury (T) powierzchni plastra jabłka w funkcji zawartości wody

Fig. 5. Changes of temperature (T) of surface of apple slices as a function of water content



Rys. 6. Zmiany temperatury (T) wnętrza plastra jabłka w funkcji zawartości wody

Fig. 6. Changes of temperature (T) of interior apple of slices as a function of water content

Suszenie plasterów jabłek charakteryzują trzy okresy, które są widoczne na prezentowanych wykresach przebiegów temperaturowych. Początek procesu suszenia to szybki i wysoki wzrost temperatury powierzchni, który charakteryzuje wstępne nagrzanie surowca. W zakresie zawartości wody od 5 do 3 $\text{kg H}_2\text{O}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.s. wartość temperatury na powierzchni jest niezmienna co jest charakterystyczne dla okresu stałej szybkości suszenia. Równocześnie powolny

wzrost temperatury wnętrza plastra, zwłaszcza w przypadku wysokich temperatur suszenia, powoduje zapoczątkowanie procesów dyfuzyjnych. Po okresie stałej temperatury powierzchni plastra następuje jej powolny wzrost osiągając pod koniec suszenia wartość bliską temperaturze powietrza suszącego. Ten okres cechuje malejąca prędkość suszenia, która jest uwarunkowana współczynnikiem wewnętrznej dyfuzji wody.

Zmiany temperatury powierzchni i wnętrza plastra suszonego dla podobnych zawartości wody przebiegają w innych zakresach temperatur, co wpływa na powstanie znacznych różnic temperaturowych między powierzchnią a wnętrzem suszonego plastra. Różnice te w odniesieniu do tych samych zawartości wody mogą osiągać wartość 15°C.

Na rys. 5 i 6 przedstawiono zmiany temperatury powierzchni oraz wnętrza suszonego plastra o grubości 5 i 10 mm dla wybranej temperatury i prędkości powietrza suszącego. Charakter zmian temperaturowych powierzchni i wnętrza plastra w przypadku badanych dwóch grubości jest podobny. Natomiast różnica temperatury powierzchni i wnętrza plasterów o grubości 10 mm jest znacznie wyższa niż w przypadku plasterów o grubości 5 mm i tak odpowiednio dla zawartości wody 2 kg H₂O·kg⁻¹ s.s. wynosi ok. 20°C (g = 10 mm) i ok. 13°C (g = 5 mm).

Wnioski

1. Krzywe nagrzewania kostek jabłek mają charakter rosnący w całym zakresie zawartości wody bez wyraźnie zaznaczonego okresu stałej temperatury powierzchni. Wzrost temperatury powietrza suszącego powoduje skrócenie czasu, w którym powierzchnia jabłek osiąga porównywalną temperaturę. Jednocześnie jabłka uzyskały porównywalną temperaturę powierzchni przy istotnie niższych zawartościach wody.
2. Krzywe szybkości nagrzewania wartość maksymalną osiągają na początku procesu suszenia, po czym wartość ta maleje wraz z ubytkiem wilgoci. Wzrost temperatury powietrza suszącego podnosi wartość szybkości nagrzewania na początku procesu.
3. Nagrzewanie plasterów jabłek przebiega w trzech etapach: wstępnego nagrzewania, okresu stałej temperatury powierzchni oraz okresu jej wzrostu. Jednocześnie stwierdzono różnice temperatur między powierzchnią a wnętrzem suszonych plasterów, powiększające się wraz ze wzrostem ich grubości.

Literatura

KAMIŃSKI E., JANOWICZ L., KRAMKOWSKI R., PEROŃ S. 1999. *Analiza zużycia ciepła podczas konwekcyjnego suszenia jabłek*. IX Sympozjum Suszarnictwa. Łódź, 22–24 IX 1999. ZNPŁ 825: 37–46.

KAMIŃSKI E., PEROŃ S., KRAMKOWSKI R., SZARYCZ M., JANOWICZ L. 1998. *Analytical models of apples drying processes*. Proceeding of 3-rd Nutriion Symposium „European Research Towards Safer and Better Food”. Gaukel and Spies (red.). Kalsruhe, 18–20 X 1998. Cz. 3: 69–77.

NICOLAI B.M., DE BAERDEMAEKER J. 1996. *Sensitivity analysis with respect to the surface heat transfer coefficient as applied to thermal process calculations*. Journal of Food Engineering 28: 21–33.

STANKIEWICZ K. 1990. *Podstawowe właściwości termofizyczne surowców i przetworów owocowych i warzywnych*. Cz. 1. Przem. Ferm. i Owoc-Warz. 7: 12–15.

STANKIEWICZ K. 1992. *Podstawowe właściwości termofizyczne surowców i przetworów owocowych i warzywnych*. Cz. 2. Przem. Ferm. i Owoc-Warz. 2: 10–12.

Słowa kluczowe: suszenie konwekcyjne, krzywe temperaturowe, jabłka

Streszczenie

W pracy dokonano analizy wpływu temperatury powietrza suszącego na efekt nagrzewania powierzchni i wnętrza suszonego jabłka dla różnych jego form rozdrobnienia (plastry i kostka). Dodatkowo określono szybkość nagrzewania surowca dla zmiennych parametrów procesu suszenia. Stwierdzono odmienny charakter nagrzewania, zależny od rodzaju rozdrobnienia. W przypadku kostki z jablek proces wzrostu temperatury powierzchni i wnętrza ma charakter rosnący, w całym zakresie zawartości wody, bez wyraźnie zaznaczonych etapów. Natomiast trzy okresy wzrostu temperatury charakteryzuje nagrzewanie plastrów z jablek, w których dodatkowo występuje znaczna różnica pomiędzy temperaturą powierzchni i wnętrza.

ANALYSIS OF TEMPERATURE CHANGES OF APPLES DURING CONVECTIVE DRYING

Lesław Janowicz

Institute for Buildings, Mechanization and Electrification of Agriculture,
Warszawa

Key words: temperature curves, convective drying, apples

Summary

Analysis of the drying air temperature influence on the effect of surface and interior heating of dried apples was performed. Different shapes of material (slices and cubes) were examined. Additionally material heating rate was determined for the variable parameters of drying process. It was stated that heating process depends on the shape of the material. The course of the temperature increase of apple cubes surface and interior has rising character in the whole moisture content range without clearly marked stages. During the apple slices heating three stages of temperature increase and a significant difference between the surface and interior temperature were observed.

Dr inż. Lesław Janowicz
Instytut Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa
ul. Rakowiecka 32
02-532 WARSZAWA
e-mail: ibmer@ibmer.waw.pl