

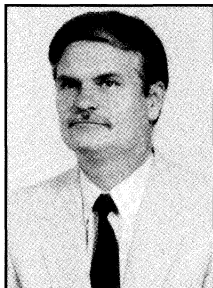
Paweł JANUS

AKADEMIA ROLNICZA W POZNANIU, INSTYTUT TECHNOLOGII ŻYWNOŚCI POCHODZENIA ROŚLINNEGO

Komputerowe sterowanie procesem suszenia konwekcyjnego krajanki ziemniaczanej oraz wyznaczenie zużycia energii

Dr inż. Paweł JANUS

Ukończył studia na Wydziale Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej w 1983 roku. Po ukończeniu studiów pracował w przemyśle. Od 1997 roku pracuje w Instytucie Technologii Żywności Pochodzenia Roślinnego Akademii Rolniczej w Poznaniu. W 1998 roku obronił pracę doktorską na Wydziale Technologii Żywności Akademii Rolniczej w Poznaniu. Jest współautorem kilkunastu wdrożonych wniosków racjonalizatorskich, wzorów użytkowych i patentu. Opublikował prawie 30 rozpraw naukowych w recenzowanych czasopiśmie naukowych. Brał udział w pracach wdrożeniowych w przemyśle.



Streszczenie

W artykule przedstawiono sposób komputerowego sterowania procesem suszenia konwekcyjnego krajanki ziemniaczanej oraz podano metodę obliczania i rejestrowania zużycia energii podczas suszenia. Stanowisko pomiarowe jest wyposażone w najnowocześniejszą aparaturę kontrolno-pomiarową produkcji polskiej i zagranicznej.

Abstract

In this article is presented the computer controll of convection drying of potatoes slice and the method of evaluation and registration the power consumption of drying process. The control station is equipped with most modern measuring and control apparatus of polish and foreign production.

1. Wprowadzenie

Zadaniem przemysłu spożywczego jest między innymi przetwarzanie świeżych produktów rolniczych do postaci dogodnej, do ich długotrwałego przechowywania z zachowaniem ich wysokiej jakości. Na świecie procesowi suszenia poddaje się w szczególności warzywa i owoce, surowce bardzo łatwo psujące się ze względu na dużą zawartość wody zwykle od 1,5 do 15 kg H₂O/kg [4]. W praktyce suszenia warzyw stosuje się wiele rozmaitych technik wykorzystujących różne mechanizmy transportu wody. Najczęściej warzywa suszy się podgrzanym powietrzem w warunkach konwekcji wymuszonej [7].

2. Podstawy teoretyczne suszenia konwekcyjnego warzyw

Teoria konwekcyjnego suszenia warzyw [11] wyróżnia istnienie dwóch różnych modeli fizycznych tego procesu. Pierwszy dotyczy wysychania ciała na tyle wilgotnego, że o jego przebiegu decydują wyłącznie warunki wymiany w warstwie granicznej powietrza suszącego wokół ciała suszonego, jest to pierwszy okres suszenia. Drugi okres suszenia dotyczy procesu, w którym o przebiegu suszenia decyduje dyfuzja wody wewnątrz suszonego ciała. Dla obydwu modeli fizycznych istnieją modele matematyczne, oparte na prawach teorii wymiany ciepła i masy.

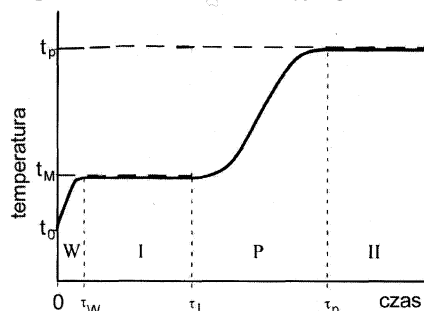
Wyniki licznych badań kinetyki konwekcyjnego suszenia różnych warzyw wskazują, iż warzywa zachowują się w trakcie suszenia inaczej niż nieorganiczne kapilarno-porowate ciała stałe o podobnej zawartości wody [8]. Podstawowa różnica między wysychaniem warzyw i większości nieorganicznych ciał stałych jest związana z wysychaniem warzyw przy malejącej szybkości suszenia już od samego początku procesu. Początkowa duża zawartość wody sprawia, iż w trakcie suszenia warzywa zwykle kurczą się, deformują

i często pękają [4]. Model pierwszego okresu suszenia, rozszerzony o skurcz suszarniczy podał Pabis [12].

Ostatnie badania nad teorią suszenia warzyw skłaniają licznych autorów do wyodrębnienia nie dwóch, lecz czterech okresów suszenia [6]. W czasie suszenia warzywa od początkowej zawartości wody u_0 większej od umownej krytycznej zawartości wody u_k , temperatura tego ciała zmienia się od temperatury początkowej t_0 do temperatury równej temperaturze powietrza suszącego t_p [10, 11]. Proces suszenia konwekcyjnego warzyw Jaros [6] proponuje podzielić na następujące cztery okresy:

- W* - faza wstępnego nagrzewania warzywa. Ze względu na stosunkowo krótki czas tego nagrzewania, wymiana masy może być pominięta i dlatego też ten okres w analizach procesu konwekcyjnego suszenia warzyw przeważnie nie jest uwzględniany,
- I* - Pierwszy okres suszenia, w którym dominujący jest mechanizm powierzchniowej wymiany masy,
- P* - Przejściowy okres suszenia, w którym mechanizmy powierzchniowej wymiany i wewnętrznej dyfuzji masy (wody) występują jednocześnie. Temperatura warzywa rośnie aż do temperatury czynnika suszącego natomiast zawartość wody w suszonym materiale maleje do zawartości, którą określa się jako krytyczną,
- II* - Okres wymiany masy, zależny od wewnętrznej dyfuzji masy, jest zwany drugim okresem suszenia. Temperatura warzywa jest wtedy bliska lub równa temperaturze czynnika suszącego.

Na rys. 1 przedstawiono wykres modelu zmian temperatury wilgotnego ciała podczas suszenia konwekcyjnego.



Rys. 1. Wykres modelu zmian temperatury wilgotnego ciała podczas suszenia konwekcyjnego

Wykres zmian temperatury suszonego materiału jest podobny do wykresu funkcji logistycznej, którą opisują rozmaite biologiczne procesy. Jaros [6] podaje następujące równanie krzywej:

$$t(\tau) = \frac{1}{a \cdot e^{m\tau} + b} + t_M \quad (1)$$

gdzie: t_M - temperatura mokrego termometru [°C], a , b , m - współczynniki proporcjonalności, τ - czas, [min].

W teorii konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych [11], do sformułowania matematycznego modelu w pierwszym okresie suszenia przyjmuje się założenie o nie zmieniających się wartościach temperatury suszonego ciała, natomiast w drugim okresie suszenia pomija się wartości gradientów temperatur w równaniu dyfuzji wody uznając, że są bardzo małe. W rezultacie przyjmuje się skokową zmianę temperatury suszonego ciała przy przejściu z pierwszego do drugiego okresu suszenia. Jak przedstawiono wyżej istnieje potwierdzony badaniami empirycznymi okres przejściowy *P* [6], między pierwszym i drugim okresem suszenia. Zagadnienie jest na tyle

skomplikowane, że do tej pory nie utworzono teoretycznie uzasadnionego algebraicznego modelu temperatury (istnieją jedynie numeryczne rozwiązania różniczkowych równań cząstkowych wymiany ciepła i masy, z których można wyznaczyć temperaturę ciała w czasie suszenia wraz z zawartością wody tego ciała [1, 9].

3. Sterowanie procesem suszenia i wyznaczenie zużycia energii

Aby sterować procesem suszenia konwekcyjnego należy określić moment kiedy temperatura krajanki ziemniaczanej jest bliska lub równa temperaturze czynnika suszącego. Następnym krokiem jest obniżenie temperatury czynnika suszącego gdy suszenie przebiega w drugim okresie suszenia w celu zmniejszenia zużycia energii. Aby wyznaczyć zużycie energii należy dokonać pomiarów i obliczeń według poniższych zależności.

Jednostkowe zużycie energii podczas suszenia jest określone zależnością [3]:

$$\frac{\Delta i}{\Delta x} = \frac{i_2 - i_1}{x_2 - x_1} \quad [\text{J/kg}] \quad (2)$$

w której: i_1, i_2 - entalpie powietrza na wejściu i wyjściu suszarki [J/kg], x_1, x_2 - zawartość wilgoci w powietrzu na wejściu i wyjściu suszarki [kg/kg].

Entalpie powietrza i oblicza się z zależności:

$$i = c_{pl} \cdot t + c_{pw} \cdot x \cdot t + r_o \cdot x \quad [\text{J/kg}] \quad (3)$$

w której: c_{pl} - średnie ciepło właściwe powietrza suchego przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)], t - temperatura powietrza [°C], c_{pw} - średnie ciepło właściwe pary wodnej przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)], r_o - ciepło parowania wody w temperaturze 0°C [J/kg], wynosi ono 2500 kJ/kg, x - zawartość wilgoci w powietrzu [kg/kg].

Zawartość wilgoci w powietrzu oblicza się z zależności:

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_w''}{p - \varphi \cdot p_w''} \quad [\text{kg/kg}] \quad (4)$$

w której: p - ciśnienie powietrza [MPa], φ - wilgotność względna powietrza, p_w'' - ciśnienie nasyconej pary wodnej [MPa].

Do wyznaczania ciśnienia nasyconej pary wodnej można korzystać z tabel albo zastosować komputer i obliczyć z zależności [5]:

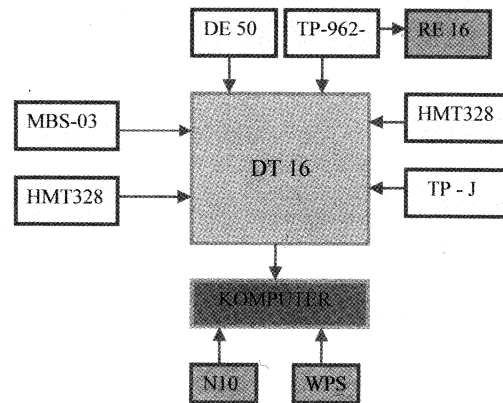
$$p_w'' = 100 \cdot \exp \left\{ 72,73974 - 8,2 \cdot \ln T + 0,0057113 \cdot T - \frac{7235,46}{T} \right\} \quad [\text{Pa}] \quad (5)$$

4. Stanowisko kontrolno-pomiarowe

Na rys. 2 przedstawiono schemat stanowiska kontrolno-pomiarowego do komputerowego sterowania procesem suszenia krajanki ziemniaczanej i wyznaczania zużycia energii. Proces suszenia jest sterowany komputerowo za pomocą komputera i podłączonego do niego poprzez interfejs RS232 miernika wielokanałowego DT 16. Do tego miernika doprowadzane są sygnały prądowe lub napięciowe od zainstalowanych na stanowisku czujników. Temperatura w kostce ziemniaczanej mierzona jest za pomocą czujnika termoelementowego TP200J-1a200-2,5. W przypadku zbliżania się temperatury w kostce ziemniaczanej do temperatury czynnika suszącego regulator obniża temperaturę czynnika suszącego dostając informacje od komputera. Temperatura czynnika suszącego jest mierzona za pomocą czujnika TP962-100KMP10x1 i regulowana za pośrednictwem regulatora RE 16. Ciśnienie dynamiczne przepływającego czynnika suszącego mierzone jest przez rurkę spiętrającą Accubar i poprzez przetwornik różnicy ciśnień DE 50 sygnałem prądowym informacja kierowana jest do DT 16. W komputerze za pomocą zależności (6) oblicza się prędkość czynnika suszącego [2]:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho}} \quad [\text{m/s}] \quad (6)$$

w której: p_d - ciśnienie dynamiczne [Pa], ρ - gęstość czynnika suszącego zależna od temperatury [kg/m³].



Rys. 2. Schemat stanowiska kontrolno-pomiarowego

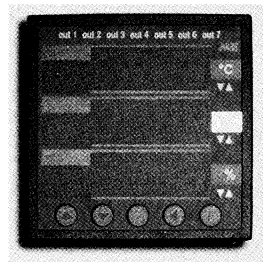
Pomiar ciśnienia atmosferycznego odbywa się za pomocą barometru MBS-03, natomiast temperaturę czynnika suszącego i jego wilgotność względną mierzy przetwornik HMT328, który przesyła sygnał prądowy do DT 16.

Zużycie energii czynnej i biernej podczas suszenia rejestrowane jest za pomocą miernika parametrów sieci typu N 10.

W celu wykreślenia krzywej suszenia potrzebna jest znajomość zawartości wilgoci w materiale, która zmienia się w czasie suszenia. Należy wyznaczyć początkową zawartość wilgoci za pomocą wago-suszarki WPS110S, dokładność pomiaru wilgotności 0,01% a masy 1 mg. Strata wilgotności podczas suszenia jest rejestrowana za pomocą ubytku masy przy użyciu wagi WPS4000/C/1 o dokładności pomiaru masy 0,01 g. Waga jest połączona z komputerem przez interfejs RS232. Co 3 minuty jest wysyłany sygnał z komputera celem pomiaru masy i wyznaczenia wilgotności.

5. Aparatura kontrolno-pomiarowa wykorzystana w stanowisku [13]

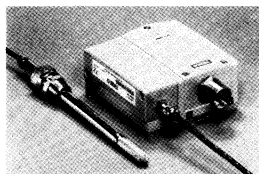
a) Miernik wielokanałowy typu DT 16 (rys. 3) jest przeznaczony do pomiaru i rejestracji temperatury, wilgotności lub innych wielkości fizycznych przetworzonych na sygnał standardowy. Umożliwia wielomiejscowe pomiary wraz z sygnalizacją przekroczeń i rejestracją wyników w wewnętrznej nieulotnej pamięci. Jest wyposażony w 16 wejść i 7 przełączników, które można przyporządkować wybranym kanałom i ustawić granice alarmowe. Występuje 6 typów wejść. W stanowisku wykorzystano następujące



Rys. 3. Miernik wielokanałowy DT 16

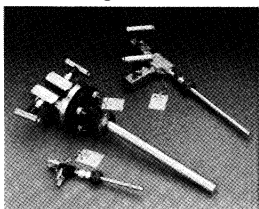
- (z możliwością automatycznej kompensacji zimnych końców) typ czujnika J, błąd pomiaru $\pm 1^\circ\text{C}$, termorezystancyjne 3-przewodowe, typ czujnika Pt 100, błąd pomiaru $\pm 0,3^\circ\text{C}$ $\pm 0,1\%$ wm, liniowe prądowe 0/4...20 mA, błąd pomiaru $\pm 0,05\%$, liniowe napięciowe 0...10 V, błąd pomiaru $\pm 0,05\%$. DT 16 posiada Interfejs komunikacyjny RS232 do współpracy IBM PC, protokół transmisji MODBUS,
- b) Barometr MBS-03 służy do pomiaru ciśnienia atmosferycznego i przetwarzania go na sygnał prądowy. Miernik wykorzystuje krzemowy, monolityczny czujnik ciśnienia. Ciśnienie mierzonego ośrodka oddziałuje na membranę i za pośrednictwem oleju silikonowego wypełniającego komorę przenoszone jest na czujnik,
- c) Przetwornik wilgotności i temperatury HMT328 (model z serii HMT320) do montażu w rurociągach (rys. 4). Przetwornik

wyposażony jest w najnowszą wersję czujnika wilgotności HUMICAP, zapewniającą dokładny i powtarzalny pomiar w całym zakresie pomiarowym. Czujnik jest odporny na zanieczyszczenia stałe oraz większość związków chemicznych. Okresowa kalibracja może zostać przeprowadzona za pomocą przesłanego przez interfejs RS232 polecenia lub wciśnięcie przycisku kalibracji. Zakres pomiarowy $-40^{\circ}\text{C} \dots +180^{\circ}\text{C}$, wilgotności $0 \dots 100\% \text{ RH}$, dokładność pomiaru $\pm 1\% \text{ RH}$ ($0 \dots 90\% \text{ RH}$), $\pm 2\% \text{ RH}$ ($90 \dots 100\% \text{ RH}$), dokładność pomiaru temperatury $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$,



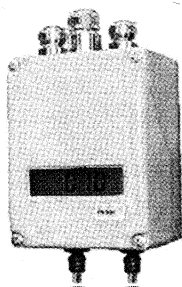
Rys. 4. Przetwornik wilgotności i temperatury HMT328

d) Rurka spiętrzająca Accubar (rys. 5) jest okrągłą uśredniająca rurką Pitota montowaną za pomocą króćca montażowego. Zamontowana w strumieniu przepływającego medium mierzy różnicę ciśnienia pomiędzy nadciśnieniem wywołanym dynamicznym naporem medium od strony napływowej (dodatniej) a podciśnieniem powstającym od strony odpływowej (ujemnej). Czujnik może mierzyć przepływ w obu kierunkach. Dokładność pomiaru 1%,



Rys. 5. Rurka spiętrzająca Accubar

e) Przetwornik różnicy ciśnień DE 50 (rys. 6) stosowany jest do pomiaru różnicy ciśnień. Działanie przetwornika oparte jest na systemie pomiarowym z elementem puszkowym stosowanym do pomiaru nad- i podciśnienia, a także ciśnienia różnicowego. Mierzone ciśnienie lub różnica ciśnień powoduje przesunięcie elementu pomiarowego i tym samym porusza rdzeń indukcyjnego przetwornika przesunięcia. Sygnał wyjściowy może przyjmować postać prądową lub napięciową. Przetwornik posiada wyświetlacz LCD,



Rys. 6. Przetwornik różnicy ciśnień DE 50

- f) Mikroprocesorowy regulator RE16 przeznaczony jest do regulacji temperatury lub innych wielkości fizycznych przetworzonych na sygnał elektryczny. Na górnym wyświetlaczu regulator pokazuje wartość mierzoną, na dolnym wartość zadaną,
- g) Miernik parametrów sieci typu N10 przeznaczony jest do zastosowań w miejscach, w których mierzonych jest wiele parametrów jednocześnie. Umożliwia wizualizację mierzonych sygnałów. Przeznaczony jest do pomiaru parametrów sieci energetycznych trójfazowych 3- lub 4-przewodowych w układach symetrycznych i niesymetrycznych z jednoczesnym wyświetlaniem mierzonych wielkości. Umożliwia sterowanie i optymalizację działania urządzeń energoelektrycznych. Zapewnia pomiar: wartości skutecznej napięcia i prądu, mocy i energii czynnej, biernej i pozornej, współczynników mocy, częstotliwości, mocy czynnych średnich np. 15 minutowych. Interfejs komunikacyjny RS485 do współpracy IBM PC, protokół transmisji MODBUS.
- h) Czujnik termoelementowy typ J TP200J-1a200-2,5,
- i) Czujnik rezystancyjny TP962-100KPM10x1,
- j) Waga WPS4000/C/1,
- k) Wagosuszarka WPS110S.

Aparatura kontrolno-pomiarowa do stanowiska komputerowego sterowania suszenia konwekcyjnego krajanki ziemniaczanej została zakupiona w MERAZECIE S.A. Poznań, dzięki fachowemu doradztwu przedstawiciela tej firmy Pani Ewy Miondowicz, za co serdecznie dziękuję.

Literatura

- [1] ABOLONE R.M., LARA M.A., GASPARI M.A., PIACENTINI M.A. (1994): Drying of biological products with significant volume variation. Experimental and modeling results for potato drying. *Drying Technology*, 12 (3): 629-647.
- [2] DOMAGAŁA A. (1996): Metodyka pomiarów w inżynierii przemysłu spożywczego. PWRiL, Poznań.
- [3] DOMAGAŁA A., GAWRYSIAK-WITULSKA M. (1996): Użytkowanie energii i wody w zakładach przemysłu spożywczego. Przykłady i zadania. Wyd. AR, Poznań.
- [4] FEINBERG B. (1973): Vegetables. W: Food dehydration. The Avi Publ. Co. Inc., Vol. 2:1-82.
- [5] Institution of Heating and Ventilation Engineers IHVE Guide Book C., London 1970.
- [6] JAROS M. (1999): Kinetyka suszenia warzyw. Rozprawa habilitacyjna. Rozprawy naukowe AR w Lublinie (224). Wyd AR w Lublinie.
- [7] JAYARMAN K.S., DASGUPTA D.K. (1992): Dehydration of fruits and vegetables - recent developments in principles and techniques. *Drying Technology* 10 (1): 1-50.
- [8] KIRANOUDIS C.T., MAROULIZ Z.B., MARKINOS-KOURIS D. (1992): Drying kinetics of onion and green pepper. *Drying Technology*, 10 (4): 995-1011.
- [9] LAQUERRE J.C., LEBERT A., TRYSTRAM G., BIMBENET J.J. (1991): A compartmental model describe drying curves of foodstuffs under variable conditions. *Drying '91*, edited by A.S. Mujumdar and I. Filikova, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- [10] ŁYKOV A.V. (1968): Teoria suszki. Wyd. Energia, Moskwa.
- [11] PABIS S. (1982): Teoria konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych. PWRiL, Warszawa.
- [12] PABIS S. (1999): The initial phase of convection drying of vegetables and mushrooms and the effect of shrinkage, *J. Agric. Engng. Res.* 72: 187-195
- [13] Katalogi aparatury kontrolno-pomiarowej firmy Merazet S.A. Poznań.

Artykuł recenzowany

Artykuł sponsorowany przez firmę MERAZET S.A. (str. 20)



MERANCO
Aparatura Kontrolno-Pomiarowa
i Laboratoryjna Sp. z o.o.



Niniejszym mamy przyjemność przedstawić naszą ofertę dotyczącą sprzętu kontrolno-pomiarowego produkcji następujących firm:

- **NUOVAFIMA** - manometry, wyłączniki ciśnieniowe, termometry
- **tec sis** - manometry, przetworniki ciśnienia, termometry, przetworniki siły
- **KLAY-INSTRUMENTS** - przetworniki ciśnienia, poziomu, przetworniki różnicy ciśnień

Gotowi jesteśmy spełnić najbardziej wyrafinowane wymagania techniczne dotyczące oferowanego sprzętu, a także zaoferować bardzo atrakcyjne warunki handlowe.

MERANCO Aparatura Kontrolno – Pomiarowa i Laboratoryjna Sp. z o.o.

ul. Myśluborska 89, 60-432 Poznań

tel. 61/ 848 98 55, 849 99 51; fax 61/ 849 99 55

e-mail: info@meranco.com.pl

www.meranco.com.pl