

PROCESY SUSZENIA WARZYW – STAN WIEDZY I PROBLEMY POZNAWCZE

Stanisław Pabis

Katedra Inżynierii Procesów Rolniczych
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

Synopsis: Omówiono stan wiedzy na temat konwekcyjnego suszenia warzyw oraz niektóre wyniki badań prowadzone w tym zakresie w Polsce. Wymieniono podstawowe problemy i zadania badawcze, wymagające rozwiązań.

Słowa kluczowe: suszenie warzyw, kinetyka suszenia, modele suszenia, problemy i zadania badawcze.

Stan wiedzy i problemy badawcze każdej naukowej specjalności określają stany teorii danych specjalności. Teorie konwekcyjnego suszenia ciał stałych, a więc również płodów rolnych, można podzielić na dwie grupy:

- teorie suszenia pojedynczych obiektów tych ciał lub ich cienkich warstw, czyli teorie kinetyk suszenia,
- teorie produkcyjnych procesów suszenia.

Teorie pierwszej grupy mają głównie znaczenie poznawcze, teorie grupy drugiej znaczenie użytkowe i mogą być wykorzystywane przez praktykę rolniczą lub przemysłową. Tworzenie teorii produkcyjnych procesów suszenia wymaga uprzedniego tworzenia teorii kinetyki suszenia danych ciał stałych.

Teoria kinetyki suszenia ciał stałych powstała na bazie matematycznej teorii konwekcyjnego suszenia pojedynczych ciał stałych, której (abstrakcyjnymi i wyłącznie bezpośrednimi) dziedzinami były [Newman, 1931, 1931a.; Sherwood, 1931] regularne figury geometryczne: kule, płyty, prostopadłości i walce, wypełnione substancją mogącą posiadać dowolnie zakładane właściwości termofizyczne. Teoria ta została znacznie pogłębiona i rozszerzona przez Łykowa i jego współpracowników, np.: Łykow (1950 i 1968), Łykow (1966) głównie przez opracowanie wielu podstawowych matematycznych modeli procesów

wymiany ciepła i masy. Należy tu jednak dodać, że ani Newman i Sherwood ani Łykov i jego współpracownicy nie wprowadzili do matematycznych modeli tej teorii zmienności termofizycznych współczynników suszonych ciał stałych ani zmienności (kurczenia się) ich objętości w miarę wysychania. Ten fakt znacznie ograniczał wykorzystywanie matematycznej teorii kinetyki suszenia do opisywania procesów suszenia produktów kurczących się, a więc także niektórych płodów rolnych, głównie owoców i warzyw.

Omawiana matematyczna teoria kinetyki suszenia ciał stałych stała się podstawą dla tworzenia teoretycznie uzasadnionych matematycznych modeli kinetyki suszenia różnych płodów rolnych. Poczynając od prac Hustrulida i Flikke (1959) oraz Hendersona i Pabisa (1961, 1962) wielu badaczy rozpoczęło modelowanie kinetyki suszenia różnych płodów rolnych na podstawie równań tej teorii, potwierdzając jej przydatność szczególnie do modelowania kinetyki suszenia ziarn i nasion. Dalsze prace badawcze, szczególnie prowadzone w Polsce w latach 1961-1970, doprowadziły do sformułowania ogólnej [Pabis, 1982] teorii konwekcyjnego suszenia płodów rolnych oraz niektórych teorii szczególnych (teorii niektórych procesów produkcyjnych).

Prace doskonalące teorię kinetyki konwekcyjnego suszenia płodów rolnych są kontynuowane w różnych krajach, w tym również w Polsce, gdzie m.in. sformułowano matematyczne teoretyczne modele procesów suszenia w suszarkach bębnowych; zielonek [Markowski, 1989] a ziarna rzepaku [Łapczyńska-Kordon, 1990] oraz udoskonalono matematyczny model kinetyki konwekcyjnego suszenia ziarna pszenicy, [Jaros, 1992].

Badanie i modelowanie procesów konwekcyjnego suszenia warzyw i owoców rozpoczęto znacznie później. Pomiary kinetyki suszenia różnych warzyw i owoców, wskazujące na zmniejszanie się szybkości suszenia tych produktów (prawie) od rozpoczęcia ich suszenia, skłoniły niemal wszystkich badaczy tych procesów do modelowania kinetyki ich suszenia wyłącznie, różnego rodzaju, modelami właściwymi do modelowania drugiego okresu suszenia. W ten sposób pominięto istnienie okresu pierwszego, mimo bardzo wysokiej początkowej zawartości wody w tych produktach. Takie postępowanie było równoznaczne z przyjęciem hipotezy, że o kinetyce suszenia warzyw i owoców decyduje od początku ich suszenia wyłącznie wewnętrzna dyfuzja ciepła i wody, mimo iż w stosowanych uproszczonych równaniach uwzględniano niemal zawsze tylko dyfuzję wody.

Zatem kinetykę suszenia warzyw i owoców opisywano, i opisuje się jeszcze, równaniami z klasy funkcji wykładniczych, w których średnia zawartość wody u w czasie τ przedstawiana jest w postaci zależności od początkowej u_0 i równowagowej u_r zawartości wody oraz współczynnika szybkości suszenia K (zależnego również od wartości wewnętrznej dyfuzji wody w suszonym produkcie)

$$u = f(u_0, u_r, K, \tau) \quad (1)$$

$$\text{np.:} \quad u = (u_0 - u_r)e^{-K\tau} + u_r \quad (2)$$

Ponieważ funkcje tej klasy wystarczająco dobrze aproksymują wyniki pomiarów kinetyki suszenia warzyw, więc uznano je za matematyczne modele kinetyki suszenia warzyw w całym okresie ich suszenia.

Taki pogląd nie znajduje uzasadnienia, zresztą nie został on nigdzie wogóle uzasadniany, jest natomiast sprzeczny z teorią suszenia. Ze względu bowiem na to, że początkowa zawartość wody warzyw wynosi od kilku do kilkunastu kg wody/kg suchej masy warzyw, należało, zgodnie z przesłankami teorii suszenia, oczekiwać wystąpienia pierwszego okresu suszenia w procesie suszenia warzyw. W okresie tym, jak wiadomo, o przebiegu procesu decydują głównie zewnętrzne warunki wymiany ciepła i masy a szybkość suszenia – o ile te warunki nie ulegają zmianie i nie zmieniają się wymiary suszonego produktu – jest stała. Przebieg suszenia, $u(\tau)$, w tym okresie, przedstawia oczywiście linia prosta. Ze względu jednak na występowanie podczas suszenia warzyw suszarniczego skurczu nie jest możliwy wyłącznie prostoliniowy przebieg tego procesu w pierwszym okresie suszenia, a więc proces ten nie musi, w tym okresie, przebiegać ze stałą prędkością suszenia. Fakt ten nie przeczy jednak istnieniu pierwszego okresu suszenia. Wymaga natomiast modyfikacji teoretycznych równań kinetyki suszenia przez wprowadzenie zmian objętości, a faktycznie powierzchni suszonego ciała, w zależności od zmian jego zawartości wody w procesie suszenia.

Zagadnienie to było jednym z zadań badawczych w Katedrze Inżynierii Procesów Rolniczych SGGW w czasie realizacji w latach 1992-1994 projektu badawczego Komitetu Badań Naukowych, pt.: "Rozwój energooszczędnych metod suszenia i przechowywania produktów rolniczych spełniających wymagania jakości produktów i ekologii oraz opracowanie systemu ekspertowego". Opracowano wówczas teoretycznie uzasadnione modele kinetyki suszenia uwzględniające występowanie suszarniczego skurczu: buraków ćwikłowych [Markowski i inni, 1994], cebuli [Piotrowska, Wierzejski, 1994], marchwi [Lisiecki, 1994], pieczarek [Murakowski, 1994]. Uogólniony model kinetyki suszenia warzyw i owoców w pierwszym okresie suszenia [Pabis, 1994] pozwala modelować kinetyki suszenia tych warzyw oraz czosnku z błędem względnym nie przekraczającym jednego procenta:

$$u(\tau) = u_0 \left[\frac{1}{1-b} \left(1 - \frac{1-b}{3u_0} k\tau \right)^3 - \frac{b}{1-b} \right] \quad (3)$$

$$k = \frac{A_0 \alpha}{M_s r} (t - t_A) \quad (4)$$

$$t_A = t_M \quad (5)$$

$$b = \frac{\rho_0}{\rho_S(1+u_0)} \approx \frac{0,85}{1+u_0} \quad (6)$$

Teoretycznie uzasadniony model procesu suszenia warzyw w suszarkach tunelowych (współ- i przeciwpąd) opracował Markowski (1994). Model ten, będący układem równań różniczkowych rozwiązywanych numerycznie wymaga wprawdzie jeszcze udoskonalenia, niemniej wiadomo już, że będzie to model mogący znaleźć zastosowanie praktyczne w modelowaniu procesów produkcyjnych.

Badania procesów suszenia warzyw w SGGW, a także owoców prowadzone w Instytucie Mechanizacji Rolnictwa Akademii Rolniczej we Wrocławiu pod kierunkiem prof. dra hab. Eugeniusza Kamińskiego, pozwoliły już na częściowe naukowe poznanie tych procesów. Niemniej jednak jest to dopiero początek prac badawczych zmierzających do wypracowania wiedzy naukowej, zadowalającej uczonych i przydatnej w praktyce. W tym celu konieczne jest:

- utworzenie teorii konwekcyjnego suszenia warzyw jako ujednocionej teorii ogólnej, oraz, na jej podstawie, utworzenie teorii procesów technologicznych, mogących znaleźć zastosowanie w praktyce,
- przeprowadzenie prac badawczych dostarczających empirycznych danych potrzebnych do opracowania programów dwukryterialnej optymalizacji procesów suszenia warzyw i owoców w suszarkach tunelowych (maksimum jakości suszu przy minimalizacji kosztów suszenia),
- opracowanie programów i systemów optymalnego sterowania tymi procesami,
- opracowanie naukowo uzasadnionych metod projektowania suszarek, spełniających wymagania optymalizacji procesów suszenia oraz opracowanie wytycznych do budowy nowoczesnych zakładów suszenia warzyw i owoców o wydajnościach dostosowywanych do warunków lokalnych.

Wykaz symboli

- u - zawartość wody w ciele stałym,
- u_0 - początkowa zawartość wody,
- u_r - równowagowa zawartość wody,
- K - współczynnik suszenia w drugim okresie,
- τ - czas suszenia,
- b - współczynnik skurczu suszarniczego,

- A_0 - początkowa powierzchnia suszonego ciała,
 M_S - sucha masa suszonego ciała,
 r - ciepło parowania wody z powierzchni suszonego ciała,
 t_A - temperatura powierzchni suszonego ciała,
 t - temperatura czynnika suszącego,
 t_M - temperatura mokrego termometru,
 α - współczynnik wnikania ciepła do suszonego ciała,
 ρ_0 - gęstość początkowa suszonego ciała,
 ρ_S - gęstość suchej masy suszonego ciała.

Bibliografia

- Henderson, S.M., S. Pabis. 1961. Grain drying theory: I. Temperature effect on drying coefficient. J. agric. eng. res. No 6.
- Henderson, S.M., S. Pabis. 1962. Grain drying theory: IV. The effect on airflow rate on the drying index. J. agric. eng. res. No 7.
- Hustrulid, A., A. M. Flikke. 1959. Theoretical drying curve for shelled corn. Trans. ASAE, No. 2.
- Jaros M. 1992. Matematyczny model konwekcyjnego suszenia pojedynczego ziarna pszenicy ze zmiennym współczynnikiem wewnętrznej dyfuzji wody. Rozprawa doktorska, SGGW.
- Lisiecki K. 1994. Model kinetyki suszenia pojedynczych obiektów marchwi w warunkach konwekcji swobodnej. ZPPNR, Zeszyt 417.
- Łapczyńska - Kordon B. 1990. Opracowanie modelu procesu suszenia w suszarce bębnowej uwzględniającego zmienność niektórych współczynników i oddziaływania losowe. Rozprawa doktorska, WTiER, AR Kraków.
- Łykow A.W. 1950, 1968. Teoria suszki. Energiya, Moskwa.
- Łykow A.W. 1966. Heat and Mass Transfer in Capillary – Porous Bodies. Pergamon Press, London.
- Markowski, M. 1989. Matematyczny model procesu suszenia zielonki w suszarce bębnowej. Rozprawa doktorska, SGGW.
- Markowski, M., Jaros M., Kaleta A. 1994. Analiza procesu konwekcyjnego suszenia buraków ćwikłowych. ZPPNR, Zeszyt 417.
- Markowski, M., E. Piotrowska. 1994. Modelowanie procesu suszenia warzyw w suszarce tunelowej. ZPPNR, Zeszyt 417.
- Murakowski, J. 1995. Badania kinetyki konwekcyjnego suszenia pieczarek. Rozprawa doktorska, WTRiL, SGGW.
- Murakowski, J. 1994. Suszenie pieczarek w warunkach konwekcji naturalnej - modelowanie pierwszego okresu suszenia. ZPPNR, Zeszyt 417.
- Newman, A.B. 1931. The Drying of Porous Solids: Diffusion Calculations, Trans. Am. Inst. of Chem. Eng. Vol. 31.

- Newman, A.B. 1931a. The Drying of Porous Solids: Diffusion and Surface Emission Equations. Trans. Am. Inst. of Chem. Eng. Vol. 31.
- Pabis, S., S. M. Henderson. 1961. Grain drying theory: II. A critical analysis of the drying curve for shelled maize. J. agric., eng. res., No 6.
- Pabis, S., S. M. Henderson. 1962. Grain drying theory: III. The air /grain temperature relationship. J. agric. eng. res., No 7.
- Pabis, S. 1982. Teoria konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych. PWRiL, Warszawa.
- Pabis, S. 1994. Uogólniony model kinetyki suszenia warzyw i owoców w pierwszym okresie suszenia. ZPPNR, Zeszyt 417.
- Piotrowska, E., J. Wierzejski. 1994. Budowa i analiza matematycznego modelu suszenia cebuli. ZPPNR, Zeszyt 417.
- Sherwood, T.K. 1931. Application of Theoretical Diffusion Equations to the Drying of Solids. Trans. Am. Inst. of Chem. Eng. Vol. 27.

S. Pabis

PROCESSES OF VEGETABLE DRYING - STATE-OF-ART AND STUDY PROBLEMS

Summary

State of our knowledge on drying processes of vegetables is at much lower level than that on drying processes of grains, seeds, and green fodder. Mathematical models of drying kinetics, presented so far in the literature of the subject, do not consider the initial period of drying these materials. This is faulty approach, from the view point of both the theory of drying and the science methodology. This paper presents some results of studies of drying processes of vegetables, carried out at the Department of Agricultural Processes Engineering of the Warsaw Agricultural University in the years 1992-1994. The studies allowed us to elaborate mathematically plausible models of drying kinetics of red beet, onion, garlic, carrot and mushroom. General model of kinetics of vegetable drying is also presented, as well as actual problems and research trends of vegetable drying processes are pointed out.