CZASOPISMO TECHNICZNE M
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

z. 2-M/2008
ISSN 0011-4561
ISSN 1897-6328

PAULINA NATKANIEC, ANDRZEJ LASZUK*

# SYSTEM KOLEKTOR SŁONECZNY–SUSZARKA

# SYSTEM OF SOLAR COLLECTOR–DRYER

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań kinetyki suszenia jabłek oraz sprawności $\eta_s$, $\eta_k$, $\eta_{inst}$ w systemie słoneczny kolektor powietrzny–suszarka. Nie zaobserwowano okresu stałej szybkości suszenia. Przebieg krzywej suszenia jabłek zdeterminowany jest przez wewnętrzną dyfuzję wilgoci.
Wzrost wydatku masowego suszącego powietrza $G$ powoduje obniżenie sprawności suszenia $\eta_s$ i wzrost sprawność kolektora $\eta_k$. Zwiększenie załadunku suszarki powoduje wzrost sprawności pracy instalacji $\eta_{inst}$.

*Słowa kluczowe: słoneczny kolektor powietrzny, sprawność suszenia jabłek, sprawność systemu kolektor słoneczny-suszarka*

Abstract

This paper reports the results of a drying kinetic of apples and efficiency $\eta_s$, $\eta_k$, $\eta_{inst}$ study on solar drying system, consisting of a double-flow solar air heaters connected to a drying chamber. A constant rate period was not observed in drying of apples. Experimental drying curves showed only a falling drying rate period, because the inner mass transfer determines the final drying process of apples.
The results show that when the flow rate $G$ increases, the drying efficiency $\eta_s$ decreases and the collectors efficiency $\eta_k$ increases. The system efficiency $\eta_{inst}$ increases with the increases in mass of the apples in the drying chamber.

*Keywords: solar air collector, drying efficiency of apples, system solar collector-dryer efficiency*

* Mgr inż. Paulina Natkaniec (doktorantka), dr hab. inż. Andrzej Laszuk, prof. PK, Politechnika Krakowska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

## 1. Wstęp

Suszenie jest jednym z najstarszych sposobów konserwowania żywności, w tym owoców. Proces ten ma na celu usunięcie wody z produktu przez jej odparowanie. Zmniejszenie aktywności wody hamuje rozwój drobnoustrojów – bakterii i grzybów. Zminimalizowane zostają również przemiany enzymatyczne i nieenzymatyczne wewnątrz suszonego produktu. Usunięcie wody powoduje zmniejszenie masy i objętości suszonych owoców. Owoce i warzywa zawierają duże ilości wody, na przykład jabłka ok. 86%, pomidory ok. 95%. Natomiast susz owocowy zawiera 12-18% wilgoci. W takim stanie jest on trwały, ponieważ posiada znaczne ilości cukrów i kwasów organicznych, które ograniczają rozwój mikroflory i enzymów. Do najczęściej wykorzystywanych w tym celu procesów należy suszenie konwekcyjne.

Proces suszenia materiału biologicznego, w tym jabłek, zależy głównie od ich budowy tkankowej, stanu rozdrobnienia i struktury. Jeżeli suszony materiał ma budowę komórkową, zjawisko dyfuzji wilgoci jest złożone. Spowodowane jest to niejednorodnym charakterem materiału – komórki otoczone błonami, przedzielone komorami powietrznymi w postaci przestrzeni międzykomórkowych, czego typowym przykładem jest struktura miąższu jabłek.

Wyniki badań kinetyki procesu konwekcyjnego suszenia jabłek [1-3] wskazują na to, że o przebiegu krzywej suszenia decyduje wewnętrzny, dyfuzyjny ruch wilgoci. Trudno jest w tym przypadku zaobserwować okres stałej szybkości suszenia.

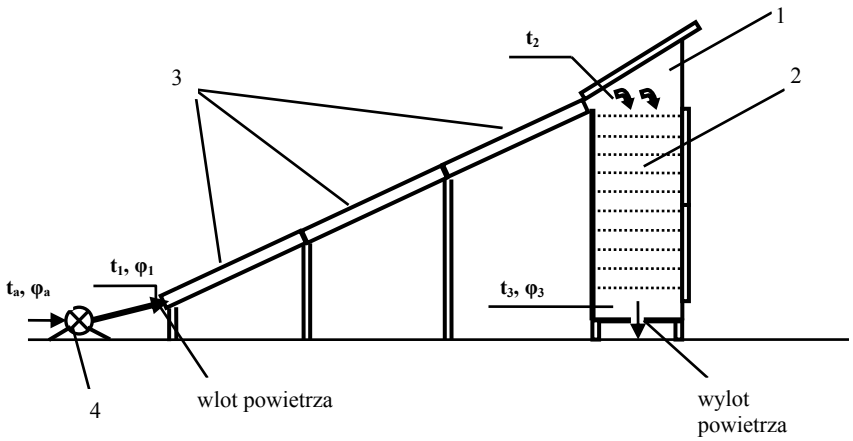
Wykorzystanie energii promieniowania słonecznego do suszenia płodów rolnych jest znane od dawna i coraz bardziej popularne ze względu na liczne jego zalety ekologiczne i ekonomiczne. Instalacja suszarnicza bazująca na energii promieniowania słonecznego składa się ze słonecznego kolektora powietrznego, komory suszarniczej i wentylatora. Konwersja energii słonecznej na cieplną zachodzi w kolektorze powietrznym. Większość płodów rolnych, w tym owoce, suszy się na ogół w temperaturze 55-70$^{o}$C [4]. Odpowiednio dobrana powierzchnia i konstrukcja kolektora powietrznego zapewnia uzyskanie wymaganej temperatury powietrza suszącego.

## 2. Instalacja badawcza

Badania procesu suszenia jabłek prowadzono w warunkach rzeczywistych na instalacji słoneczne kolektory powietrzne–suszarka, rys. 1. Powietrze ogrzane w trzech dwukanałowych kolektorach ($3\times2$ m$^2$) kierowano do suszarki (1 m$^2\times2$ m), w której suszono jabłka pocięte na plasterki rozłożone na tacach aluminiowych. W kolektorach zastosowano tani, płaski absorber aluminiowy z pokryciem nieselektywnym. W tym przypadku wysoka sprawność kolektorów nie była najważniejsza, lecz ich niski koszt.

W trakcie badań rejestrowano następujące parametry: temperaturę i wilgotność powietrza zewnętrznego i powietrza na wlocie do kolektorów, temperaturę powietrza na wlocie do suszarki, temperaturę i wilgotność powietrza wypływającego z suszarki, prędkość powietrza przepływającego przez kolektory słoneczne oraz natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię kolektorów i ubytek masy suszonych jabłek.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ




Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – suszarka, 2 – tace aluminiowe, 3 – kolektory, 4 – wentylator

Fig. 1. Schematic of solar air dryer: 1 – dryer, 2 – aluminum trays, 3 – air collectors, 4 – fan

Zakres badań obejmował badania kinetyki suszenia jabłek oraz sprawności suszenia $\eta_s$, kolektorów $\eta_k$, instalacji kolektory-suszarka $\eta_{inst}$ dla wydatku masowego powietrza $G = 0{,}042 \pm 0{,}005$ kg/s i $G = 0{,}078 \pm 0{,}005$ kg/s.

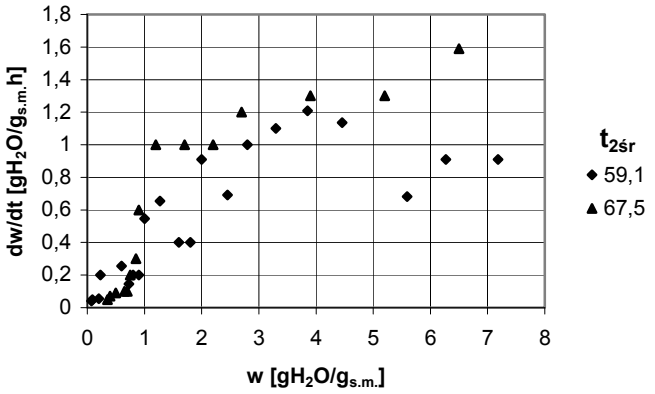
Na jednej tacy układano 2 kg świeżych owoców pociętych na plasterki o grubości 0,005 m. Badania wykonano dla masy $m$ = 4, 6, 10, 14 kg świeżych owoców. W celu osiągnięcia jednolitego suszu, tace w suszarce zamieniano miejscami. Ubytek masy odczytywano co godzinę, a po 4 godzinach co pół godziny.

## 3. Wyniki badań

Na podstawie wyników badań procesu suszenia jabłek wyznaczono krzywe suszenia tych owoców. Wyniki przykładowych serii badań pokazano na rys. 2 i 3 dla dwóch wydatków masowych powietrza $G$ = 0,042 kg/s i 0,078 kg/s oraz skrajnych wartości średniej temperatury powietrza suszącego $t_2$.

Szybkość suszenia jabłek w instalacji badawczej wykazuje dużą jej zmienność. Spowodowane jest to tym, iż proces prowadzono w warunkach rzeczywistych. Temperatura powietrza wlotowego do suszarki zmieniała się w trakcie badań w zależności od natężenia promieniowania słonecznego.

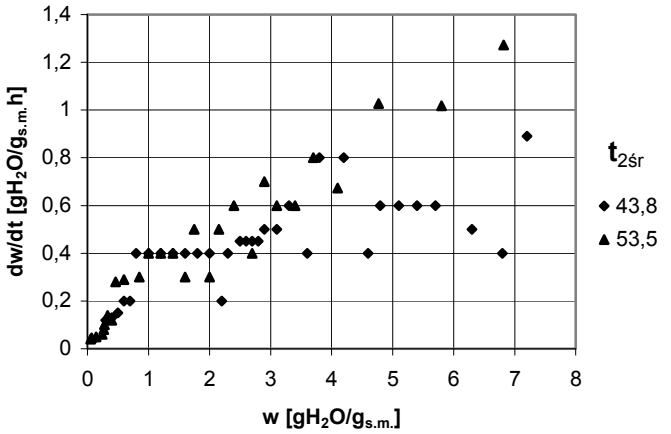
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ




Rys. 2. Zależność szybkości suszenia jabłek od wilgotności jabłek dla $G$ = 0,042 kg/s, $m$ = 14 kg

Fig. 2. Variation of drying rate with moisture content of apples for $G$ = 0,042 kg/s, $m$ = 14 kg

Wraz ze wzrostem temperatury powietrza suszącego wzrasta szybkość suszenia. Zmniejszenie wydatku powietrza powoduje wzrost jego temperatury w kolektorach i skrócenie czasu suszenia. Przykładowo dla masy 14 kg świeżych owoców szybkość suszenia dla mniejszego wydatku powietrza $G$ = 0,042 kg/s jest wyższa od szybkości suszenia dla $G$ = 0,078 kg/s o około 0,3 $gH_2O/g_{sm}$, a dla wilgotności jabłek w zakresie 1-7 $gH_2O/g_{sm}$, rys. 2, 3.




Rys. 3. Zależność szybkości suszenia jabłek od wilgotności jabłek dla $G$ = 0,078 kg/s, $m$ = 14 kg

Fig. 3. Variation of drying rate with moisture content of apples for $G$ = 0,078 kg/s, $m$ = 14 kg

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Wyniki badań wykazały, że w przypadku suszenia jabłek nie występuje wyraźnie okres stałej szybkości suszenia. Spowodowane jest to występowaniem skurczu suszarniczego podczas procesu suszenia. Powoduje on wzrost oporu wymiany masy i wynika ze zmniejszania się powierzchni suszonego materiału. W jabłkach wilgoć stanowi integralną ich część. Zamknięta jest we włóknach i drobnych porach wewnętrznych. Ruch wilgoci jest powolny i odbywa się w wyniku jej dyfuzji przez wewnętrzną strukturę suszonego miąższu jabłka do jego zewnętrznej powierzchni. W rezultacie krzywe suszenia jabłek wykazują występowanie bardzo krótkiego, wręcz niezauważalnego pierwszego okresu suszenia [1-3]. Cały proces suszenia jest więc głównie limitowany przez wewnętrzny, dyfuzyjny ruch wilgoci, który decyduje o ostatecznym przebiegu krzywej suszenia.

## 4. Sprawność instalacji suszarniczej zintegrowanej z układem słonecznych kolektorów powietrznych

Ocenę pracy suszarki dokonano na podstawie sprawności energetycznej suszenia. Sprawność ta jest zdefiniowana jako stosunek energii cieplnej zużytej w procesie suszenia do energii cieplnej uzyskanej przez powietrze w wyniku ogrzania w kolektorach.

$$\eta_s = \frac{\int_0^\tau r \cdot W d\tau}{\int_0^\tau \frac{G}{1+Y_1}(i_2 - i_1) d\tau} \tag{1}$$

Sprawność energetyczną kolektorów wyznaczono z zależności (2) jako stosunku energii cieplnej uzyskanej przez powietrze w kolektorach do energii promieniowania słonecznego padającego na ich powierzchnię

$$\eta_k = \frac{\int_0^\tau \frac{G}{1+Y_1}(i_2 - i_1) d\tau}{A\int_0^\tau I_\beta d\tau} \tag{2}$$

Całkowita sprawność instalacji jako systemu słoneczne kolektory powietrzne-suszarka jest równa iloczynowi sprawności kolektorów i sprawności suszarki

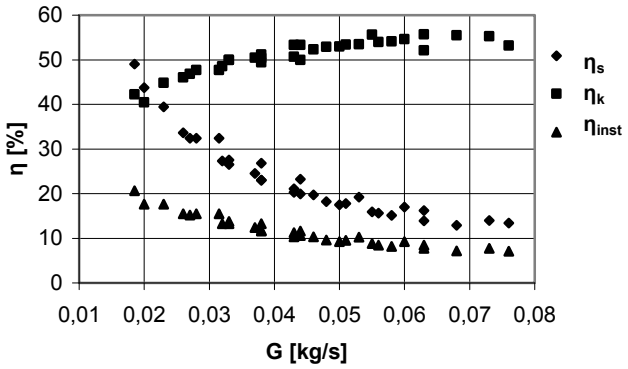
$$\eta_{inst} = \eta_k \cdot \eta_s \tag{3}$$

Na podstawie badań wykazano, że sprawność instalacji $\eta_{inst}$ wzrasta wraz z załadunkiem suszarki oraz ze zmniejszeniem wydatku powietrza $G$. Im wyższa temperatura powietrza na wylocie z kolektorów, tym krótszy czas suszenia danej masy owoców i większa sprawność suszenia. Jednocześnie sprawność kolektorów maleje [5-7].

Warunki procesowe badań systemu kolektory powietrzne–suszarka uwzględniono przy rozwiązaniu równań opisujących model matematyczny wymiany ciepła w powietrznym kolektorze słonecznym [7]. Warunki te obejmowały następujące parametry: strumień

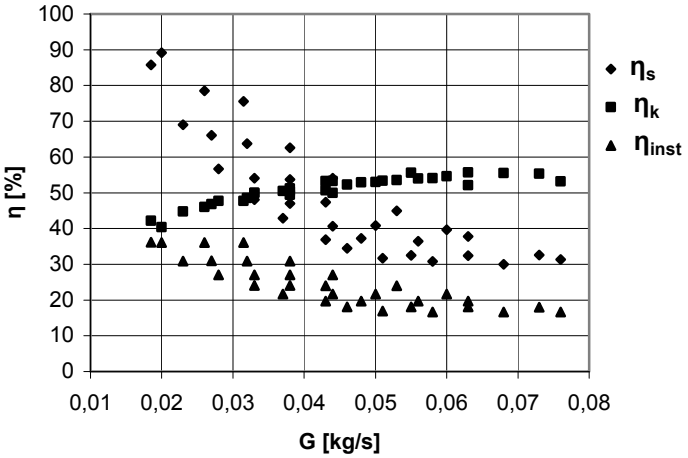
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

powietrza, temperaturę powietrza na wpływie i odpływie z kolektorów, temperaturę otoczenia oraz natężenie promieniowania słonecznego.




Rys. 4. Zależność zmiany sprawności suszenia $\eta_s$, sprawności kolektorów $\eta_k$ i sprawności systemu $\eta_{inst}$ od wydatku powietrza $G$ dla $m$ = 4 kg owoców

Fig. 4. Variation of drying efficiency $\eta_s$, collectors efficiency $\eta_k$ and system efficiency $\eta_{inst}$ with air flow rate $G$ for $m$ = 4 kg fruit




Rys. 5. Zależność zmiany sprawności suszenia $\eta_s$, sprawności kolektorów $\eta_k$ i sprawności systemu $\eta_{inst}$ od wydatku powietrza $G$ dla $m$ = 14 kg owoców

Fig. 5. Variation of drying efficiency $\eta_s$, collectors efficiency $\eta_k$ and system efficiency $\eta_{inst}$ with air flow rate $G$ for $m$ = 14 kg fruit

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Na podstawie rozwiązań modelu matematycznego wymiany ciepła w kolektorze oraz wyników doświadczalnych czasu suszenia wyznaczono teoretyczną sprawność kolektorów $\eta_k$, suszenia $\eta_s$ oraz sprawność instalacji $\eta_{inst}$. Różnice otrzymanych doświadczalnie i teoretycznie sprawności $\eta_k$, $\eta_s$, $\eta_{inst}$ wynoszą do około 5%.

Przeprowadzono również teoretyczną analizę wpływu wydatku masowego suszącego powietrza $G$ na sprawność suszenia $\eta_s$. W analizie tej wykorzystano także wyniki badań doświadczalnych oraz wyniki rozwiązań modelu matematycznego wymiany ciepła w zastosowanym układzie kolektorów. Dla utrzymania stałej temperatury powietrza wpływającego do suszarki $t_2$ = 60, 65, 70, 75°C, przy natężeniu promieniowania słonecznego $I_\beta$ = 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650 W/m$^2$ wyznaczano wydatek powietrza $G$. Sprawność procesu suszenia $\eta_s$ maleje wraz ze wzrostem wydatku powietrza $G$ i wzrasta ze wzrostem masy suszonych owoców, rys. 4 i 5.

Analogicznie zbadano wpływ wydatku masowego suszącego powietrza $G$ na sprawności $\eta_k$, $\eta_{inst}$, rys. 4, 5. Wraz ze wzrostem wydatku masowego powietrza $G$ wzrasta sprawność kolektorów $\eta_k$, maleje sprawność suszenia $\eta_s$ i sprawność instalacji $\eta_{inst}$. Zwiększenie masy suszonych owoców powoduje wzrost sprawności suszenia $\eta_s$ i jednocześnie sprawności pracy instalacji $\eta_{inst}$.

## 5. Podsumowanie

Zastosowany układ aparaturowy słoneczne kolektory powietrzne–suszarka spełnił warunki potrzebne do podgrzania powietrza w celu wykorzystania jego w procesie suszenia jabłek. Jakość uzyskanego suszu jest dobra.

Badania kinetyki suszenia pokrojonych w plasterki jabłek wykazały, że nie zaobserwowano okresu stałej szybkości suszenia. Decydujący wpływ na szybkość suszenia mają wewnętrzne warunki dyfuzji wilgoci. Szybkość suszenia jabłek zależy od porowatości i budowy tkankowej oraz stanu rozdrobnienia. Jeżeli proces suszenia jabłek przebiega na początku w zbyt wysokiej temperaturze, to na powierzchni plasterka owocu tworzy się twarda powłoka, która zatrzymuje wilgoć wewnątrz suszonego materiału. Zjawisko to jest bardzo niepożądane, gdyż prowadzi do rozrywania, pękania zewnętrznej powierzchni suszonych owoców.

Wraz ze wzrostem prędkości przepływu powietrza w kanałach kolektorów zmniejsza się przyrost jego temperatury. Niższa temperatura suszącego powietrza wydłuża czas suszenia i obniża sprawność procesu suszenia. Powoduje to również zmniejszenie sprawności całego systemu, mimo że sprawność kolektorów wzrasta.

## Oznaczenia

| | | | |
|---|---|---|---|
| $A$ | – | powierzchnia kolektora | [m²] |
| $G$ | – | wydatek masowy powietrza | [kg/s] |
| $i$ | – | entalpia powietrza | [kJ/kg$_{ps}$] |
| $I_\beta$ | – | natężenie promieniowania słonecznego | [W/m$^2$] |
| $m$ | – | masa owoców | [kg] |
| $r$ | – | ciepło parowania | [kJ/kg] |

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

| | | | |
|---|---|---|---|
| $t$ | – | temperatura powietrza | [$^{o}$C] |
| $W$ | – | ilość odparowanej wilgoci w czasie | [kg/s] |
| $w$ | – | wilgotność jabłek odniesiona do suchej masy | [g $H_2O/g_{sm}$] |
| $Y$ | – | wilgotność bezwzględna powietrza | [kg/$kg_{ps}$] |
| $\eta$ | – | sprawność | [%] |
| $\tau$ | – | czas suszenia | [s] |

## Literatura


[1] Wang Z., Sun J., Liao X., Chen F., Zhao G., Wu J., Hu X.: Food Research International, **40**, 2007, 9-46.

[2] Sacilik K., Elicin A.K.: Journal of Food Engineering, **73**, 2006, 281-289.

[3] Bennamoun L., Belhamir A.: Journal of Food Engineering, **59**, 2003, 259-266.

[4] El–Sebaii A.A., Aboul–Enein S., Ramadan M.R.I., El–Gohary H.G.: Energy Conversion and Management, **43**, 2002, 2251-2266.

[5] Natkaniec P., Laszuk A.: Inżynieria i Aparatura Chemiczna, **6**, 2007, 22-26.

[6] Natkaniec P., Laszuk A.: Czysta Energia, **9**, 2007, 54-55.

[7] Natkaniec P., Laszuk A.: Environment Protection Engineering, **1**, 2006, 57-64.


BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ