

ANALIZA SUSZENIA KOLENDRY W STAŁYM ZŁOŻU Z OKRESOWYM MIESZANIEM

Mariusz SURMA, Klaudiusz JAŁOSZYŃSKI, Marta PASŁAWSKA, Bogdan
STĘPIEŃ, Aleksander KRZYŚ

Streszczenie: Celem pracy było uzyskanie informacji odnośnie możliwości zastosowania suszenia w złożu nieruchomym z okresowym przemieszaniem do suszenia kolendry i przebiegu procesu oraz kinetyki ubytków wody. W pracy przedstawiono badanie suszenia kolendry dwoma metodami, metodą suszenia konwekcyjnego w stałym złożu oraz w złożu nieruchomym z okresowym przemieszaniem. Suszenie w złożu nieruchomym z okresowym mieszaniem przeprowadzono przy użyciu suszarki fontannowej. Proces suszenia przeprowadzono w trzech temperaturach czynnika suszącego. Przy suszeniu konwekcyjnym w stałym złożu użyto temperatury 50, 60, 70°C, natomiast przy użyciu suszarki fontannowej 60, 70, 80°C. Określono dynamikę procesu suszenia kolendry, a także dobrano modele empiryczne najlepiej opisujące kinetykę suszenia obu metod. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów oraz równań korelacyjnych.

Słowa kluczowe: suszenie, kolendra, konwekcja naturalna, suszenie w złożu nieruchomym

1. Wstęp i cel pracy

Kolendra siewna (*Coriandrum sativum*) pochodzi z rodziny selerowatych i należy do grona roślin wzniesionych osiągających ponad 70 cm wysokości. Jej dolne liście mają dłuższe ogonki o szerokich blaszkach. Jest to roślina jednoroczna, ciemnozielone, błyszczące liście kolendry przypominają wyglądem liście pietruszki. Roślina posiada białe lub lekko czerwone kwiaty złożone w baldachy, występujące od czerwca do sierpnia. Nasiona kolendry mają kształt kulisty o średnicy około 3mm. Występują w barwie od słomkowożółtej do szarobrunatnej. Roślina początkowa charakteryzuje się nieprzyjemnym zapachem, a przy końcu jej wegetacji zapach staje się słodki i pachnący. Kolendra jest bogata w witaminy C, A, B₂ oraz tłuszcze, w tym kwasy tłuszczowe. Największą zawartością charakteryzuje się kwas petroselinowy, wykorzystywany często w przemyśle. Pozostałe kwasy występujące w tej roślinie to kwas linolowy, kwas oleinowy, kwas palmitynowy i kwas stearynowy [3, 5].

Liście kolendry mogą różnić się smakiem w zależności od kraju w którym są uprawiane. Ich smak może być ostry lub bardziej łagodny. Kraj uprawy wpływa również na kształt i wielkość owoców rośliny.

Kolendra to roślina uprawiana od ponad 3000 lat. Informacje o leczniczych jak i kulinarnych zastosowaniach tej rośliny można odszukać w zapiskach sprzed czasów naszej ery. Kolendra pochodzi z krajów basenu Morza Śródziemnego, natomiast do Europy została sprowadzona przez Rzymian.

Liście kolendry również niosą ze sobą liczne prozdrowotne właściwości. Świeże posiadają polifenole – są to organiczne związki, które mają działanie przeciwutleniające i zmniejszają ryzyko wystąpienia chorób nowotworowych oraz dolegliwości związanych z układem krwionośnym. Wykazują też korzystny wpływ na produkcję czerwonych

krwinek. Liście kolendry zawierają ogromną ilość witaminy A, która pozytywnie działa na skórę oraz wzrok.

W wyniku suszenia żywności następuje spadek zawartości wody w materiale, a tym samym zmniejszenie jego objętości i usztywnienie jego zewnętrznych warstw. Narastający gradient wilgotności wywołuje napięcie w środku materiału, co powoduje uszkodzenie struktury. Związane z tym jest powstanie skurczu produktu poddanemu suszeniu i załamaniu jego struktury [20].

Skurcz produktów spożywczych jest częstym zjawiskiem fizycznym zachodzącym podczas suszenia różnych materiałów. Zmiany te mają duży wpływ na jakość produktów, powodując zmiany w jego objętości, a także zmniejszenie wymiaru powierzchni wymiany ciepła i masy. Spadek zawartości wody i ogrzewanie powodują naprężenia w strukturze komórkowej żywności, powodując zmianę kształtu, a także rozmiaru. Skurcz materiałów spożywczych podanych suszeniu ma negatywny wpływ na ich jakość. Zmiany kształtu, spadek objętości i zwiększona twardość powodują w większości przypadków niekorzystne wrażenie w konsumentach [1].

Zmiana kształtu, a także skurcz uzależnione są od pierwotnej struktury materiału, a także jego porowatości oraz składu chemicznego. Skurcz jest silnie powiązany z porowatością, a także z gęstością. Im skurcz mniejszy, tym mniejsza jego gęstość, ale większa porowatość, która wzrasta podczas suszenia. [7, 10, 11]

Duże oddziaływanie na gęstość materiału wywiera metoda oraz parametry procesu suszenia. Gęstość związana jest również z wyjściowym produktem, im jest on bardziej dojrzały tym jego gęstość jest większa. Skurcz materiału również wpływa na jego porowatość, która warunkuje właściwości mechaniczne i teksturę produktu. Porowatość wzrasta podczas suszenia, a rodzaj zmian związany jest z surowcem poddanym temu procesowi. Pod koniec suszenia wytwarza się stan szklisty, który poprawia wytrzymałość mechaniczną, oraz utrudnia skurcz zwiększając porowatość [2].

W czasie suszenia, jakość produktu ulega znacznej zmianie w zależności od parametrów procesu. Przy działaniu na produkt podwyższoną temperaturą, ulega zmianie nie tylko jego struktura wewnętrzna ale również barwa, oraz aromat. Zmiany te są szczególnie widoczne, podczas suszenia z wykorzystaniem gorącego powietrza [4].

Modyfikacja barwy w większości przypadków suszonej żywności jest widoczna i może informować o innych zmianach, które zaszły w produkcie, podczas procesu suszenia. Zmiana barwy jest jednym z głównych wyznaczników jakościowych suszonej żywności, dlatego podczas suszenia producenci przetwarzanej żywności starają się osiągnąć barwę podobną do tej przed obróbką [19].

Podczas suszenia konwekcyjnego można zaobserwować silniejsze zmiany barwy materiału poddanemu suszeniu niż w przypadku innych metod. W celu zminimalizowania wpływu suszenia na zmianę barwy istotne jest dobranie odpowiednich parametrów suszenia np. użycie mikrofal w sposób impulsowy korzystnie wpływa na utrzymanie barwy zbliżonej do tej którą posiadał surowiec. Krótkotrwałe impulsy powodują szybsze usuwanie wilgoci z materiału, natomiast dłuższe powodują zwiększenie temperatury materiału i uzyskanie suszu o niższej jakości [7].

W związku z dużą lotnością związków aromatycznych, są one czułe na działanie wysokich temperatur, stosowanych w czasie suszenia. Niszczenie substancji zapachowych ma również związek z obecnością tlenu podczas suszenia, co prowadzi do utleniania związków zapachowych, które są związane z aromatem produktu. W konsekwencji tego powstają nienaturalne, obce zapachy [7]

Doświadczenia na skalę laboratoryjną niektórych badaczy zajmującym się suszeniem krajanek owocowo-warzywnych [3, 8] sugerują, że korzystniejsze wskaźniki techniczno-ekonomiczne można uzyskać susząc je w warstwie sfluidyzowanej.

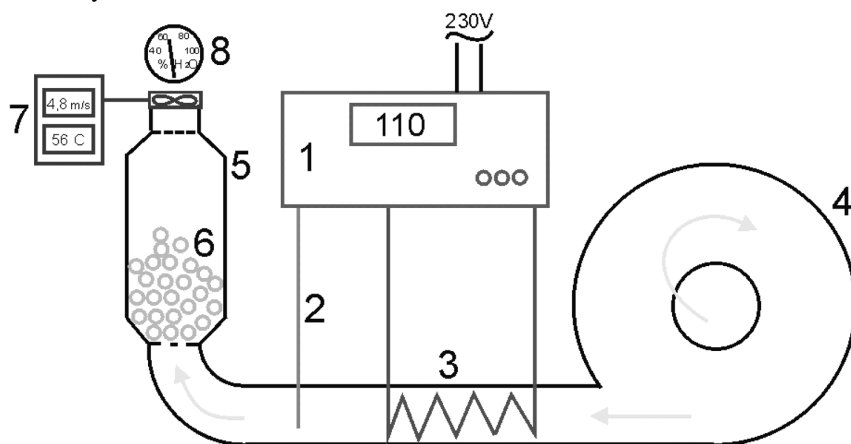
Głównym celem badań tej pracy była modyfikacja powszechnie stosowanej konwekcyjnej metody suszenia kolendry z zadaniem wyeliminowania szeregu wad tej metody, takich jak długotrwały czas suszenia, słaba jakość produktów suszonych.

Celem pracy było uzyskanie informacji odnośnie możliwości zastosowania suszenia w złożu nieruchomym z okresowym przemieszaniem do suszenia kolendry i przebiegu procesu oraz kinetyki ubytków wody.

2. Materiał i metodyka

Do badań użyto świeżych liści kolendry o wilgotności początkowej około 90% w przypadku złoża nieruchomego z okresowym przemieszaniem i około 94% przy suszeniu konwekcyjnym. Przygotowanie materiału do suszenia polegało na pocięciu liści na drobne części o długości około 1 cm.

W przypadku suszenia w złożu nieruchomym z okresowym przemieszaniem (w suszarce fontannowej) doświadczenie przeprowadzono na próbkach o masie około 200 g każda. Suszenie próbek prowadzono w temperaturze 60°C, 70°C, oraz 80°C. Prędkość przepływającego powietrza ustalono w taki sposób, aby złożo pozostało nieruchome. Prędkość przy której złożo nie fontannowało to 2 m·s⁻¹. Prędkość czynnika suszącego mierzono na wylocie z komory suszenia za pomocą anemometru skrzydełkowego YK-80 AP z dokładnością do ±0,1 m·s⁻¹. Schemat i zasadę działania stanowiska pomiarowego przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 – nagrzewnica z regulatorem temperatury, 2 – termopara, 3 – nagrzewnica, 4 – wentylator, 5 – komora suszenia, 6 – złożo, 7 – anemometr, 8 – miernik wilgotności

Masę ubytków wody z materiału mierzono początkowo co 2 minuty, a gdy zmiany masy były niewielkie co 5 minut. Pomiarów dokonywano poprzez ważenie całej komory suszenia wraz z materiałem przy użyciu wagi WLC 3/6/A2 z dokładnością ±0,1 g.

Przy suszeniu konwekcyjnym doświadczenie przeprowadzono na próbkach o masie około 13 g każda. Suszenie próbek prowadzono w temperaturze 50°C, 60°C, oraz 70°C. Prędkość

przepływającego powietrza ustalono na 0,5 m·s⁻¹ i mierzono za pomocą anemometru skrzydełkowego YK-80 AP z dokładnością do ±0,1 m·s⁻¹.

Masę ubytków wody z materiału mierzono przez pierwsze 20 minut suszenia co 2 minuty, a następnie co 5 minut, aż do momentu zakończenia procesu suszenia, przy użyciu wagi PS 600/C/2 z dokładnością ±0,001.

Materiał poddany suszeniu suszono od zawartości początkowej około 9 kgH₂O·kg⁻¹ s.s. (przy suszeniu s suszarce fontannowej) i około 15 kgH₂O·kg⁻¹s.s. (przy suszeniu konwekcyjnym) do zawartości końcowej ok. 0,05 kgH₂O·kg⁻¹s.s.

Przy określaniu początkowej i końcowej zawartości wody w materiale wykorzystano metodę suszarkową wg PN 90/A-75101.03. Każdy cykl pomiarów powtarzano trzykrotnie. Dla lepszej czytelności wykresów czas został przedstawiony w minutach PN-ISO 30-1:2000/A1.

Do obliczenia względnej zawartości wody posłużono się wzorem :

$$MR = \frac{U_{\tau} - U_r}{U_0 - U_r} \quad (1)$$

gdzie: MR - względna zawartość wody [-], U_τ - zawartość wody po czasie τ [kgH₂O·kg⁻¹ s.s.], U₀ - początkowa zawartość wody [kgH₂O·kg⁻¹ s.s.], U_r - równowagowa zawartość wody [kgH₂O·kg⁻¹ s.s.].

Przy wyznaczaniu modeli empirycznych posłużono się algorytmem optymalizacji nieliniowej Levenberga-Marquardta. Poprzez zastosowanie średniego błędu kwadratowego RMSE [8], błędu standardowego (SE) oraz współczynnika determinacji (R²), określono dopasowanie wybranych modeli opisujących kinetykę suszenia [12].

Do opisu kinetyki ubytków wody w suszonym materiale wybrano najczęściej wykorzystywane modele stosowane do opisu przebiegu procesu suszenia.

Tab. 1. Modele matematyczne wykorzystywane do opisu przebiegu suszenia

Nazwa modelu	Formuła matematyczna
Lewisa-Newtona	MR = exp(-k·τ)
Page'a	MR = exp(-k·τ ²)
Hendersona-Pabisa	MR = a·exp(-k·τ)
Zmodyfikowany Hendersona-Pabisa	MR = a·exp(-k·τ) + b·exp(-g·τ) + c·exp(-h·τ)
Dwuczynnikowy	MR = a·exp(-b·τ) + c·exp(-d·τ)
Logarytmiczny	MR = a·exp(-k·τ) + b
Wanga-Singha	MR = 1 + a·τ + b·τ ²
Midilliego	MR = a·exp(k·τ ⁿ) + b·τ

k - współczynnik suszarniczy [min⁻¹]; a, b, c, d, g, h, n – parametry modelu; τ – czas [s]

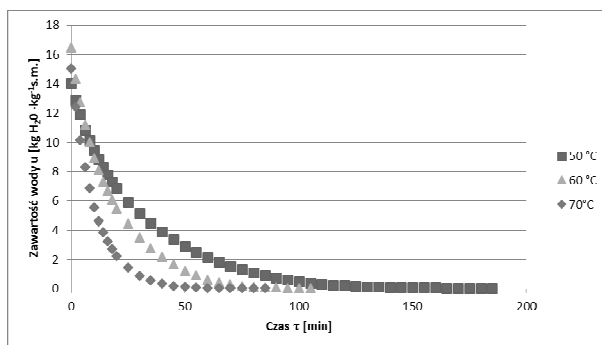
Źródło: opracowanie własne na podstawie [6, 17]

3. Wyniki i dyskusja

Najpowszechniej wykorzystywaną metodą na skale przemysłową jest suszenie konwekcyjne. Posiada ono wiele zalet i wad. Do zalet należy zaliczyć niskie koszty urządzeń i technologiczne, a do wad najbardziej destrukcyjny wpływ na suszony materiał

powodujący duże zmiany fizykochemiczne (prowadzące do zmiany związków chemicznych oraz struktury komórkowej) [18].

Na rysunku 2 przedstawiono spadek zawartości wody u w czasie τ w kolendrze suszonej konwekcyjnie w trzech temperaturach, 50, 60, 70°C przy prędkości czynnika fontannującego 0,5 m·s⁻¹.



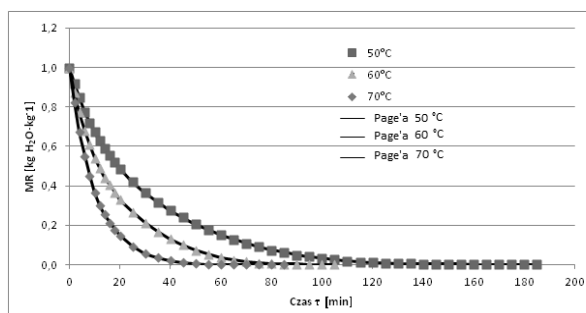
Rys. 2. Spadek zawartości wody u w czasie τ suszonych konwekcyjnie świeżych liści kolendry
Źródło: opracowanie własne

Jak wynika z wykresu spadek zawartości wody w surowcu od ok. 15 kgH₂O·kg⁻¹ s.m. do zawartości końcowej wody ok. 0,05 kgH₂O·kg⁻¹s.m. (co odpowiadało zmianie wilgotności w zakresie od ok. 94% do 5%) dla temperatury 50°C wynosił 185 min. Podwyższenie temperatury czynnika suszącego do 60°C spowodowało skrócenie czasu suszenia do 105 minut. Zastosowanie najwyższej temperatury do 70°C spowodowało spadek czasu suszenia do 85 minut.

Z przebiegu krzywych można wnioskować, że zastosowanie temperatury 60 i 70°C znacząco skraca czas suszenia kolendry w odniesieniu do temperatury 50°C. Podwyższenie temperatury z 50°C do 70°C spowodowało skrócenie czasu suszenia o ok. 46%.

Tak duży wzrost może być spowodowany dużą powierzchnią materiału i jego małą grubością, co wiąże się z szybkim nagrzewaniem całego materiału.

Na rysunku 3 przedstawiono spadek zawartości wody MR w czasie τ suszonych konwekcyjnie w suszarce kolumnowej świeżych liści kolendry.



Rys. 3. Spadek zawartości wody MR w czasie τ suszonych konwekcyjnie świeżych liści kolendry
Źródło: opracowanie własne

Jak wynika z rysunku w zbliżonych warunkach procesowych największą dynamiką charakteryzowała się kolendra suszona w temperaturze 70°C w czasie 85 minut. Zmniejszenie dynamiki procesu nastąpiło przy temperaturze czynnika suszącego 60°C i przy czasie 105 minut, a najniższe parametry dynamiki ubytków wody nastąpiły w temperaturze 50°C i najdłuższego czasu suszenia 185 minut.

Na podstawie porównania wyliczonych współczynników statystycznych R², RMSE (średni błąd kwadratowy), błędu standardowego SE oceniono przydatność wybranych modeli matematycznych do opisu procesu odwadniania kolendry w suszeniu konwekcyjnym przy określonych parametrach procesowych.

Tab. 2. Współczynniki dopasowania modeli do przebiegu procesu suszenia konwekcyjnego w stałym złożu kolendry w temperaturze 50, 60, 70 °C

Nazwa modelu	Temperatura	R ²	RMSE	SE
Lewisa/Newtona	50°C	0,998	0,017	0,014
	60°C	0,998	0,017	0,015
	70°C	0,099	0,004	0,004
Page'a	50°C	<u>0,099</u>	<u>0,01</u>	<u>0,009</u>
	60°C	<u>0,099</u>	<u>0,009</u>	<u>0,009</u>
	70°C	<u>0,099</u>	<u>0,004</u>	<u>0,004</u>
Hendersona-Pabisa	50°C	0,998	0,017	0,014
	60°C	0,998	0,017	0,015
	70°C	0,999	0,004	0,004
Zmodyfikowany Hendersona-Pabisa	50°C	0,464	0,314	0,222
	60°C	0,998	0,012	0,013
	70°C	0,858	0,205	0,111
Dwuczynnikowy	50°C	0,999	0,013	0,009
	60°C	0,998	0,014	0,008
	70°C	0,999	0,004	0,004
Logarytmiczny	50°C	0,998	0,013	0,013
	60°C	0,998	0,013	0,014
	70°C	0,999	0,004	0,004
Wana -Singha	50°C	0,948	0,109	0,069
	60°C	0,944	0,109	0,072
	70°C	0,871	0,155	0,106
Midilliego-Kucuka	50°C	0,999	0,007	0,005
	60°C	0,999	0,006	0,006
	70°C	0,989	0,003	0,003

Źródło: opracowanie własne

Stwierdzono, że w każdym z analizowanych temperatur czynnika suszącego, kolendrę najlepiej opisywał model Page'a. Po dobraniu współczynników, kinetykę suszenia można przedstawić jako zależność $MR=f(\tau)$. Model zaproponowany przez Page'a został wykorzystany do opisu odwadniania kolendry w suszarce konwekcyjnej.

$$MR=\exp(-k \tau^2)$$

gdzie: k - współczynnik suszarniczy [min^{-1}]

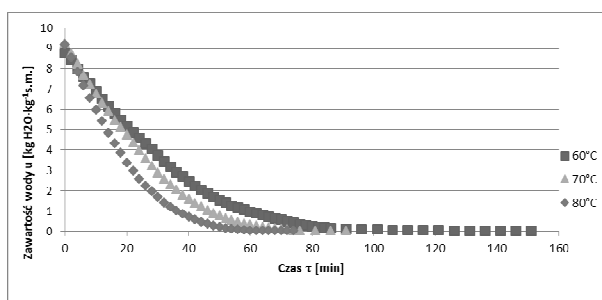
W trakcie suszenia konwekcyjnego poza pierwszymi kilkoma minutami temperatura nagrzania cząstek materiału była bliska temperaturze czynnika suszącego z tego względu nie uwzględniono zmian nagrzewania się cząstek materiału.

W trakcie suszenia konwekcyjnego materiał rozłożony jest w warstwie na sitach, taśmach, co powoduje jego nierównomierne suszenie, jeśli warstwa zostanie rozłożona w za dużej wysokości. Suszenie w złożu nieruchomym z okresowym przemieszaniem pozwala na znaczne zwiększenie wysokości warstwy suszącej (bez możliwości niedosuszenia materiału), zmniejszenie strat ciepła.

Zastosowanie suszenia fontannowego do suszenia roślin typu kolendra, nać pietruszki, seler, lubczyk, mięta, nie jest możliwe z tego względu, że w trakcie suszenia następuje ciągłe tarcie materiału o siebie i ściany komory. Powoduje to bardzo mocne rozdrobnienie, pylenie i wywiewanie materiału z komory suszenia.

Aby temu zapobiec zastosowano suszenie w suszarce fontannowej w złożu stałym, z okresowym mieszaniem. Ta metoda pozwoli na zlikwidowanie nierównomierności suszenia i w całej warstwie nie następuje rozdrobnienie materiału poprzez tarcie.

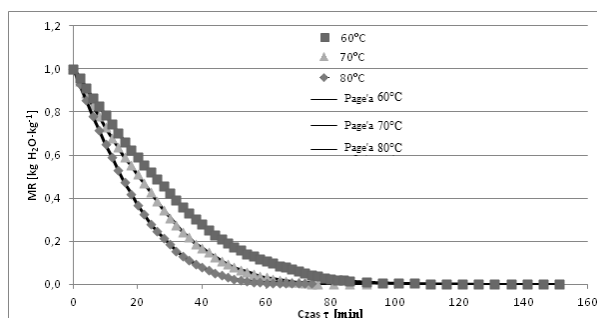
Na rysunku 4 przedstawiono spadek zawartości wody w kolendrze suszonej w nieruchomej warstwie z okresowym mieszaniem.



Rys. 4. Spadek zawartości wody u w czasie τ suszonych w suszarce fontannowej świeżych liści kolendry
Źródło: opracowanie własne

Z wykresu wynika, że przy prędkości czynnika suszącego $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (kiedy nie następowało fontannowanie) oraz wysokości złoża $H_0=0,15 \text{ m}$, wraz ze wzrostem temperatury znacznie uległ skróceniu czas suszenia. Zwiększając temperaturę czynnika suszącego z 60 do 80°C , rozpatrując obniżenie zawartości wody z $9 \text{ kgH}_2\text{O}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.s.}$ do ok. $0,05 \text{ kgH}_2\text{O}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.s.}$ uzyskano skrócenie czasu suszenia ze 151 do 76 minut. Zastosowanie pośredniej temperatury 70°C , spowodowało skrócenie czasu suszenia do 91 minut. Zwiększenie temperatury z 60 do 80°C skutkowało ok. 2-krotnym skróceniem czasu suszenia.

W celu porównania spadku zawartości wody MR od czasu τ w procesie suszenia kolendry w złożu nieruchomym z okresowym mieszaniem na rysunku 5 przedstawiono punkty pomiarowe dla trzech temperatur.



Rys. 5. Spadek zawartości wody MR w czasie τ w suszonych w suszarce fontannowej świeżych liści kolendry
Źródło: opracowanie własne

Jak wynika z rysunku w zbliżonych warunkach procesu suszenia kolendry w stałym złożu ($H_0=15\text{cm}$) z okresowym mieszaniem największą dynamiką procesu suszenia charakteryzowała się kolendra suszona w temperaturze 80°C przy czasie 76 minut. Zmniejszenie temperatury suszenia do 70 i 60°C skutkowało obniżeniem tempa suszenia kolendry przy czasie 91 i 151 minut do wilgotności końcowej $0,05 \text{ kg H}_2\text{O}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.s.

Na podstawie porównania wyliczonych współczynników statystycznych R^2 , RMSE (średni błąd kwadratowy), SE (błąd standardowego) oceniono przydatność wybranych modeli matematycznych do opisu procesu odwadniania kolendry w stałym złożu z okresowym mieszaniem, przy określonych parametrach procesowych.

Tab. 3. Współczynniki dopasowania modeli do przebiegu procesu suszenia kolendry w stałym złożu w temperaturze $60,70,80^\circ\text{C}$

Nazwa modelu	Temperatura	R^2	RMSE	SE
Lewisa/Newtona	50°C	0,992	0,04	0,026
	60°C	0,991	0,047	0,030
	70°C	0,994	0,039	0,024
Page'a	50°C	<u>0,999</u>	<u>0,011</u>	<u>0,010</u>
	60°C	<u>0,998</u>	<u>0,016</u>	<u>0,015</u>
	70°C	<u>0,999</u>	<u>0,011</u>	<u>0,010</u>
Hendersona-Pabisa	50°C	0,992	0,040	0,026
	60°C	0,993	0,047	0,03
	70°C	0,994	0,039	0,058
Zmodyfikowany Hendersona-Pabisa	50°C	0,997	0,018	0,017
	60°C	0,995	0,023	0,021
	70°C	0,374	0,243	0,241
Dwuczynnikowy	50°C	0,991	0,032	0,030
	60°C	0,996	0,019	0,020
	70°C	0,991	0,032	0,029
Logarytmiczny	50°C	0,993	0,025	0,026
	60°C	0,994	0,023	0,023
	70°C	0,995	0,021	0,021
Wana -Singha	50°C	0,974	0,057	0,049

	60°C	0,997	0,017	0,017
	70°C	0,992	0,030	0,027
Midilliego- Kucuka	50°C	0,530	0,207	0,209
	60°C	0,999	0,010	0,011
	70°C	0,552	0,202	0,204

Źródło: opracowanie własne

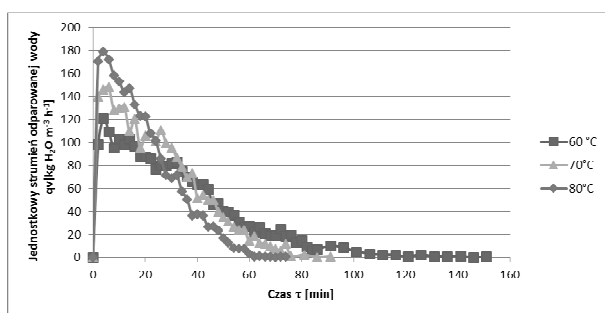
Sporządzona analiza dała możliwość określenia formuły empirycznej najlepiej opisującej proces suszenia kolendry w stałym złożu z okresowym mieszaniem. Spośród rozważanych modeli najlepiej opisywał model stworzony przez Page'a. Po doborze współczynników, kinetykę suszenia przedstawiono jako zależność $MR = f(\tau)$.

Model Page'a został wykorzystany do opisu odwadniania kolendry w stałym złożu z okresowym mieszaniem.

$$MR = \exp(-k \tau^2)$$

gdzie : k - współczynnik suszarniczy [min^{-1}]

Rysunek 6 ilustruje przebieg chwilowego strumienia wilgoci q_v w czasie τ w zależności od temperatury czynnika suszącego w złożu stałym.



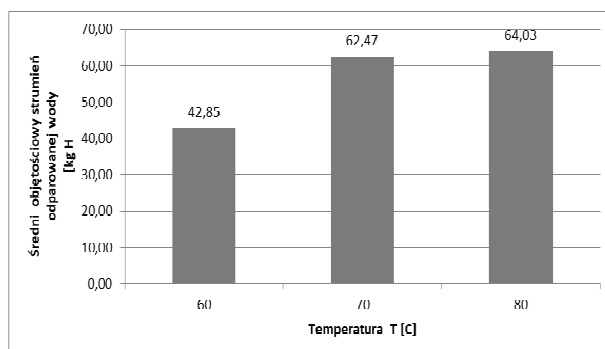
Rys. 6. Zależność jednostkowego objętościowo strumienia odparowanej wody q_v w czasie suszenia τ w świeżych liściach kolendry przy różnych temperaturach.

Źródło: opracowanie własne

Krzywe na wykresie wskazują, że przy wysokości złoża $H_0=0,15$ m najwyższy chwilowy strumień wilgoci osiągnięto dla temperatury 80°C , który wynosił ok. $170 \text{ kg}\cdot\text{H}_2\text{O m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$, a dla najniższej temperatury 60°C wynosił ok. $99 \text{ kg}\cdot\text{H}_2\text{O m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$. Można zaobserwować w pierwszych 30 minutach trwania procesu, że praktycznie połowa wilgoci została usunięta z suszonego materiału, co może być wytłumaczone tym, że materiał ma dużą powierzchnię właściwą i małą grubość, dlatego następuje szybkie nagrzewanie materiału i duża dyfuzja wody.

Jednym z ważniejszych wskaźników technologicznych, często podawanym przez producentów żywności jest średni strumień wilgoci, czyli zdolność odparowania wody z jednostki strumienia komory suszenia lub z jednostki powierzchni [14].

Na rysunku 7 został przedstawiony średni objętościowy strumień odparowanej wody z jednostki objętości komory suszenia kolendry w suszarce fontannowej.



Rys. 7. Średni objętościowy strumień wody dla świeżych liści kolendry.

Źródło: opracowanie własne

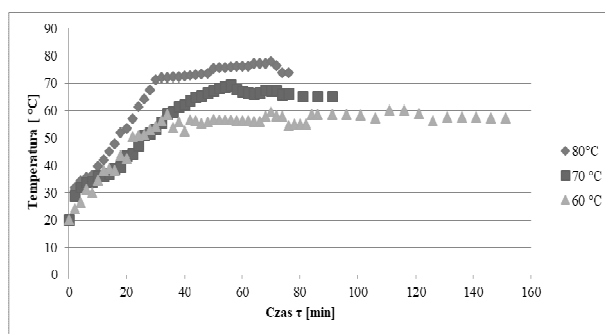
Na podstawie przedstawionego histogramu można stwierdzić, że przy wzroście temperatury czynnika suszącego z 60 do 80°C (przy stałej prędkości czynnika suszącego $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i wysokości warstwy $H_0=0,15 \text{ m}$) wartość średniego objętościowego strumienia wilgoci q_v wzrosła ok. 50% (tj z 42,85 do 64,03 $\text{kgH}_2\text{O m}^{-3}\text{h}^{-1}$).

Dla temperatur 70 i 80°C można zaobserwować prawie identyczny średni objętościowy strumień wilgoci. Różnią się tylko długością czasu suszenia. Można to tłumaczyć tym, że materiał jest niewielkiej grubości i w obu przypadkach następuje szybkie nagrzanie materiału.

Otrzymanie tak wysokich średnich objętościowych strumieni odparowanej wody, w porównaniu do innych produktów suszonych fontannowo (w zakresie $10\text{-}20 \text{ kgH}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}\text{h}^{-1}$) [3, 8], było możliwe do osiągnięcia, dlatego że komora mogła być w połowie zapełniona materiałem, co nie było by możliwe w przypadku suszenia fontannowego (musi wystąpić zjawisko fontannowania materiału).

Oprócz obliczeń ubytku masy krzywe kinetyki suszenia umożliwiają ponadto kontrolę procesu suszenia w czasie, szczególnie kontrolę szybkości tego procesu oraz tempa wzrostu temperatury materiału suszonego, co jest szczególnie ważne z punktu widzenia końcowej jakości suszonego produktu biologicznego, który jest wrażliwy na wysokie temperatury.

Rysunek 8 przedstawia zmiany temperatury kolendry w trakcie suszenia w złożu stałym z okresowym mieszaniem. Zastosowano trzy temperatury czynnika suszącego materiał 60, 70, 80°C.



Rys. 8. Zależność temperatury w czasie suszenia τ świeżych liści kolendry

Źródło: opracowanie własne

Na wykresie 8 można zauważyć, że przez pierwsze 30 minut trwania procesu następuje największy przyrost temperatury i tym samym następuje największy ubytek wilgoci z materiału. Po okresie 30 minut następuje jeszcze niewielki wzrost, a następnie stabilizacja temperatury na w przybliżeniu stałym poziomie.

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono badanie suszenia naci kolendry metodą konwekcyjną w stałym złożu i w złożu stałym z okresowym mieszaniem.

Głównym celem badań była modyfikacja powszechnie stosowanej konwekcyjnej metody suszenia z zadaniem wyeliminowania szeregu wad tej metody, takich jak długotrwały czas suszenia, zmniejszenie zużycia energii poprzez skrócenie czasu suszenia, słaba jakość produktów suszonych.

Do suszenia w złożu stałym z okresowym mieszaniem wykorzystano model suszarki fontannowej. Na podstawie analizy pomiarów określono formuły empiryczne najlepiej opisujące proces suszenia. W przypadku suszenia konwekcyjnego w złożu nieruchomym i z okresowym mieszaniem spośród rozpatrywanych modeli najlepiej obie metody suszenia opisywał model stworzony przez Page'a. Po doborze współczynników kinetykę suszenia przedstawiono jako zależność $MR = f(\tau)$.

Porównując suszenie konwekcyjne w stałym złożu i w złożu nieruchomym z okresowym mieszaniem można stwierdzić, że suszenie w złożu z okresowym mieszaniem spowodowało skrócenie czasu suszenia.

Zastosowanie modelu suszarki fontannowej do suszenia w stałym złożu z okresowym mieszaniem pozwoliło na uzyskanie bardzo wysokich wartości średniego objętościowego strumienia odparowanej wody z jednostki objętości komory suszenia w granicach ok. $64 \text{ kg H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}\text{h}^{-1}$, kiedy w suszeniu fontannowym osiąga się średnio ok. $10\text{-}20 \text{ kgH}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}\text{h}^{-1}$ w zależności od suszonego materiału.

Suszenie konwekcyjne w warunkach okresowo zmiennych jako technika suszenia materiałów szczególnie wrażliwych na działanie termiczne jest wydajnym sposobem usuwania wilgoci i utrwalania materiałów pochodzenia biologicznego.

5. Literatura

1. Ânoar Abbas El-Aouar, Azoubel P., Kurozawa L. , Simões M., Antonio G., Mur F. 2005. Study of shrinkage phenomenon during convective drying of papaya, 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering.
2. Dobrzański B., Mieszkalski L. 2007. Właściwości fizyczne suszonych surowców i produktów spożywczych. FRNA, Lublin, ISBN- 13:978-83-60489-06-2.
3. Glaser R. 1991. O możliwości suszenia krajanek warzywnych w warstwie pulsofluidalnej. Materiały VII Sympozjum Suszarnictwa. Łódź T. 1. s. 147-153.
4. Hoffmann M. 2007. Jakość sensoryczna wybranych warzyw przyprawowych liofilizowanych i suszonych konwencjonalnie. Żywność. Nauka. Technologia. Jakość, 2 (51), 91 – 97.
5. Kozłowska M., Ziarno M. 2012. Kolendra-skład i zastosowanie. Postępy Fitoterapii 2/2012, s. 108-112.
6. McMinn W.A.M., Farrell G., Magee T.R.A. 2007. Drying Techn. 25, nr 9 (2007).
7. Nowacka M., Śledź M., Wiktor A., Witrowa-Rajchert D., 2012. Fizyczne i chemiczne właściwości produktów spożywczych suszonych z wykorzystaniem mikrofal. Żywność.

- Nauka. Technologia. Jakość, 6 (85), 5 – 20.
8. Peroń S., Pęksa A., Kozłowski R. 2004. Ocena wybranych wskaźników pracy suszarki taśmowej podczas suszenia kostki ziemniaczanej. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych. Z. 500. s. 493-500.
 9. Peroń S., Surma M., Zdrojewski Z. 2009. Suszenie nasion gorczycy w złożu fontannowym. Inżynieria Rolnicza, 1(110)/2009, 219-225.
 10. Rząca M., Witrowa-Rejchert D. 2007. Suszenie żywności w niskiej temperaturze. Przemysł spożywczy, 4/2007, 30-35.
 11. Rząca M., Witrowa-Rejchert D. 2007. Wpływ techniki suszenia oraz warunków przechowywania na właściwości rekonstrukcyjne i higroskopijne suszu jabłkowego. Acta Agrophysica, 2007, 9(2), 471-479.
 12. Skorupska E. 2005. Badanie procesu suszenia konwekcyjnego pietruszki korzeniowej. Inżynieria Rolnicza Nr. 9 (69), 2005, 313-320.
 13. Stradecka A., 2004. Przyprawy niezbędne w kuchni. KDC, Warszawa, ISBN 83-7404-385-7.
 14. Strumiłło Cz., 1983. Podstawy teorii i techniki suszenia. WNT, Warszawa, ISBN 8320404185
 15. Surma M., Peroń S., Jałoszyński K., Paślawska M., Stępień B. 2013. Analiza procesu suszenia papryki czerwonej w złożu fontannowym z nagrzewaniem mikrofalowym. Inżynieria rolnicza, 17 (2013) nr 4 (147) | 345-354.
 16. Surma M., Peroń S., Jałoszyński K., Paślawska M., 2011. Wykorzystanie suszarki fontannowej do suszenia rozłogów perzu właściwego. Inżynieria Rolnicza 5(130),267-27.
 17. Sutar P.P., Prasad S. 2007. Drying Techn. 25, nr 10 (2007).
 18. Witrowa-Rejchert D. 1999. Rehydracja jako wskaźnik zachodzących w tkance roślinnej w czasie suszenia, Wydawnictwo Fundacja „Rozwój SGGW”, Warszawa.
 19. Zaremba R., Biller E. 2007. Zmiany barwy jabłek w czasie przebiegu procesu suszenia konwekcyjnego. Inżynieria Rolnicza 5(93)/2007,429-435.
 20. Yan Z., Gallagher M. J., Oliveira F.A.R. 2008. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. Journal of Food Engineering, 84, 3, 430-440.

Dr inż. Mariusz SURMA
Dr inż. Klaudiusz JAŁOSZYŃSKI
Dr inż. Aleksander KRZYŚ
Dr inż. Marta PASŁAWSKA
Dr hab. inż. Bogdan STĘPIEŃ, prof. UP
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Instytut Inżynierii Rolniczej
51-630 Wrocław, ul. Chełmińskiego 37/41
tel/fax.:(0-71)3205700
e-mail: mariusz.surma@upwr.edu.pl
klaudiusz.jaloszynski@upwr.edu.pl
aleksander.krzyś@upwr.edu.pl
marta.paslawska@upwr.edu.pl
bogdan.stepien@upwr.edu.pl